



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM PAPIRENSKÉHO STROJE

DIAGNOSTIC SYSTEM OF PAPER MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Škrobánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Martin Škrobánek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Daniel Zuth, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Diagnostický systém papírenského stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat popisem nově nasazeného diagnostického systému pro papírnu. Nový diagnostický systém obsahuje pochůzkový přístroj, online diagnostický systém a vizualizaci. V rámci nasazení nového systému je potřeba provést sérii měření pro úvodní analýzy a nastavení vyhodnocovacích úrovní pro konkrétní části stroje (hlavní válce, vodící válce a pohony). V tomto případě se jedná o problematiku pomaloběžných strojů.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti vibrodiagnostiky.

Popis diagnostikovaných strojů.

Popis metod diagnostiky pro monitorované stroje.

Popis použitého diagnostického systému.

Vytvoření a popis vyhodnocovacích algoritmů.

Vyhodnocení testových měření a určení limitních úrovní pro hlavní válce (sušící a lisovací), vodící válce a pohony (motor a převodovka).

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.

TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o technické diagnostice, přičemž se především zaměřuje na vibrační diagnostiku. Tato problematika je popsána v první části této práce v teoretické rovině. V další části je popsán papírenský stroj, diagnostický systém a jsou roztrženy měřicí body do databází. Praktickou část této práce tvoří návrh metodiky vibrační diagnostiky pro papírenský stroj, postup při měření a vyhodnocení naměřených hodnot. Součástí práce je také praktický příklad z měření centrálního válce, na kterém je zmíněny postup vyzkoušen, a sestavení nových mezních hodnot.

ABSTRACT

This master thesis deals with the technical diagnostics, focusing mainly on vibration diagnostics. This problematice is described in the first part of this work on a theoretical level. The next part describes the paper machine, diagnostic system and the measuring points are classified into databases. The practical part of this work consists of a proposal for the methodology of vibration diagnostics for a paper machine, the procedure for measuring and evaluating the measured values. Part of the work is also a practical example of the measurement of the central cylinder, on which the procedure is tested, and the compilation of new limit values.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická diagnostika, vibrodiagnostika, papírenský stroj, systém diagnostiky, údržba, spolehlivost

KEYWORDS

Technical diagnostics, vibrodiagnostics, paper machine, system diagnostics, maintenance, reliability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKROBÁNEK, M. *Diagnostický systém papírenského stroje*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2020, 97 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří především panu doc. Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za vedení této práce, za jeho cenné a přínosné rady během celého jejího vypracovávání a za motivaci, kterou mě neustále naplňoval.

Dále bych rád poděkoval firmám Smurfit Kappa Czech s.r.o. a firmě DIF spol. s.r.o., které mi umožnily zpracovat tuto práci a propůjčily potřebné vybavení.

A nakonec bych chtěl poděkovat své rodině a všem svým blízkým za jejich podporu v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Daniela Zutha, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Bc. Martin Škrobánek

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	19
2.1	Rozdělení technické diagnostiky	19
2.1.1	Tribodiagnostika	19
2.1.2	Termodiagnostika	19
2.1.3	Hluková (akustická) diagnostika	20
2.1.4	Elektrodiagnostika	20
2.1.5	Defektoskopie	20
2.1.6	Vibrodiagnostika	20
2.1.7	Multiparametrální diagnostika	21
3	VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA	23
3.1	Druhy kmitání	23
3.1.1	Periodické kmitání	23
3.1.2	Neperiodické kmitání	25
3.2	Základní veličiny popisující vibrace	25
3.3	Snímače vibrací	27
3.3.1	Snímače MEMS	27
3.3.2	Akcelerometr	28
3.3.3	Snímač rychlosti	29
3.3.4	Snímač výchylky (polohy, posunutí)	29
3.3.5	Umístění a přichycení snímačů	29
4	POUŽITÝ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM.....	31
4.1	Online měření	32
4.1.1	Diflink online	33
4.1.2	DDS online	34
4.2	Pochůzkové měření	35
4.2.1	Adash A4400 VA4 Pro II	36
4.2.2	Pochůzkové měření Dif	37
4.2.3	Pochůzkové měření SKMP	37
5	PAPÍRENSKÝ STROJ A MĚŘÍCÍ BODY	39
5.1	Příprava papírové hmoty	39
5.1.1	Suroviny na výrobu papíru	39
5.2	Smurfit Kappa	39
5.2.1	Smurfit Kappa Morava Paper	40
5.3	Přípravná látky a konstantní část papírenského stroje	41
5.3.1	Rozvlákňovač Voith	42
5.3.2	Sítové třídiče CH5 a CH7	42
5.3.3	Sítový třídič RS 205	43
5.3.4	Čerpadla M334, M421 a M422	43
5.4	Vlastní papírenský stroj	45
5.4.1	Mokrý část	45
5.4.2	Suchá část	47
5.4.3	Navíječ	48
5.5	Převíječ	50

6	METODY PRO MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VIBRACÍ PAPIRENSKÉHO STROJE.....	53
6.1	Obálková metoda	55
6.2	Trend celkové hodnoty.....	56
6.3	Frekvenční analýza	57
6.4	Časový záznam	58
6.5	Doporučené vyhodnocovací algoritmy	58
6.5.1	Diflink a DDS online	58
6.5.2	Pochůzka SKMP.....	59
6.5.3	DDS pochůzka Dif.....	59
7	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	61
7.1	Příprava k měření.....	61
7.2	Frekvenční analýza efektivní hodnoty rychlosti vibrací	63
7.3	Frekvenční analýza hodnoty špička-špička zrychlení vibrací	64
7.4	Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací filtrem 3.....	66
7.5	Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací filtrem 2.....	68
7.6	Trend celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací	70
7.7	Trend celkové hodnoty špičky zrychlení vibrací.....	70
7.8	Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací filtrem 3	71
7.9	Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací filtrem 2	71
7.10	Časový záznam rychlosti vibrací	72
7.11	Schnutí měření ložiska centrálního válce na straně pohonu.....	72
8	SESTAVENÍ MEZNÍCH HODNOT CENTRÁLNÍHO VÁLCE PO VÝMĚNĚ	73
8.1	Navržený postup pro stanovení mezí	75
8.2	Stanovení mezních efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce.....	76
8.3	Stanovení mezních špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce.....	78
8.4	Stanovení mezních hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce	80
8.5	Stanovení mezních hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce	82
9	DOPORUČENÍ PRO PRAXI	85
10	ZÁVĚR	87
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	89
12	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	91
12.1	Seznam tabulek.....	91
12.2	Seznam obrázků.....	91
12.3	SEZNAM ZKRATEK.....	94
13	SEZNAM PŘÍLOH	97

1 ÚVOD

Údržba a technická diagnostika jsou pojmy provázející lidskou rasu už od nepaměti. Vše začalo údržbou po poruše, když první lidé opravovali své primitivní nástroje až poté, co byly poškozeny. Postupně si ale lidé začali uvědomovat, že je mnohem efektivnější poruchám předcházet. Začaly se zavádět pravidelné kontroly a výměny rizikových součástí v předem stanovených intervalech a vznikla preventivní údržba. Aby nedocházelo k předčasnému zásahu a výměně ještě dobře fungující součásti, bylo třeba zdokonalit diagnostiku. Moderní diagnostika umí s předstihem určit okamžik, kdy má být proveden zásah do stroje tak, aby byla co nejvíce naplněna životnost rizikové části stroje a zároveň nedošlo k nežádoucí havárii. Tento typ údržby se v dnešní literatuře nazývá prediktivní údržba. Se stále se zrychlujícím vývojem průmyslu se zrychluje i evoluce údržby. Ta se v dnešních dnech postupně transformuje do proaktivní a totálně produktivní údržby. A spolu s údržbou se vyvíjí i technická diagnostika.

Pro rotační stroje je velmi podstatnou součástí technické diagnostiky vibrodiagnostika. Vibrace se při provozu vyskytují na všech strojních zařízeních. Zvyšující se vibrace často předem signalizují vznikající závadu. To lidem umožňuje předcházet haváriím včasným zásahem. Vibrodiagnostika, nebo též vibrační diagnostika je obor s širokou škálou metod a analýz souvisejících s údržbou strojních zařízení. Tato práce se zaměří na popis těchto metod a jejich uplatnění v praxi.

V závodu Smurfit Kappa Morava Paper byl nasazen nový diagnostický systém. Je potřeba zvolit vhodné metody diagnostiky pro monitorované stroje, vytvořit vyhodnocovací algoritmy, otestovat jejich funkčnost na testovém měření a stanovit limitní meze.

V souladu s pokyny vedoucího je tato diplomová práce rozdělena do devíti kapitol a závěru.

První kapitola obsahuje úvod.

Ve druhé kapitole bude obecně popsána technická diagnostika a její složky. Třetí kapitola se zaměří výhradně na vibrační diagnostiku. Zde budou uvedeny druhy kmitání, základní veličiny a snímače vibrací. Tím se uzavře teoretická část této diplomové práce.

Čtvrtá kapitola popíše diagnostický systém nasazený v závodu Smurfit Kappa Morava Paper, rozdíl mezi starým a novým diagnostickým systémem, rozdělení databází měření a rozdělení online měření a pochůzek. Pátá kapitola popíše princip papírenského stroje a všechny měřicí body diagnostického systému. Tím se uzavře popisná část této diplomové práce.

V šesté kapitole budou zvoleny metody k měření papírenských válců a navrženy vyhodnocovací algoritmy. V sedmé kapitole bude provedeno praktické měření za použití zvolených metod a algoritmů a tím dojde k otestování jejich funkčnosti. Osmá kapitola bude věnována sestavení mezních hodnot. Devátá kapitola bude obsahovat doporučení pro praxi. Poslední desátá kapitola bude náležet závěru této diplomové práce.

Práce bude doplněna o dvě přílohy. V první příloze bude soupis všech měřících bodů papírenského stroje rozdělených podle databází a v druhé příloze ostatní vyhodnocení měření. Tím bude uzavřena praktická část této diplomové práce.

2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Slovo diagnostika vzniklo z řeckého slova dia-gnósis, což znamená skrze poznání. Tento pojem se nejprve začal objevovat v lékařství, kde určoval a klasifikoval nějaký obvykle nežádoucí stav, zejména pak nemoci. Pro technickou praxi se tento pojem začal používat mnohem později. [2]

Do historického vývoje technické diagnostiky lze zahrnout každou činnost vedoucí k odhalení již vzniklé, nebo teprve vznikající poruchy. Mezi metody patří vše od prvopočáteční detekce poslechem, hmatem, zrakem, až po dnešní diagnostiku využívající počítačové techniky. [2]

Dnešní technická diagnostika je samostatným vědním oborem, který se zabývá určováním skutečného technického stavu objektu. Diagnostika využívá širokou škálu různých metod a diagnostických prostředků. Pokud je to možné, vždy se v tomto vědním oboru preferuje nedestruktivní a nejlépe i nedemontážní proces. K úspěšné diagnostice je zapotřebí znát chování jednotlivých částí stroje, opotřebení materiálu a způsob jakým se projevují poruchy. Samotná měření jsou založena na mnoha fyzikálních jevech. [1]

Technickou diagnostiku lze použít ve třech různých případech. V prvním případě, jde o diagnózu, tedy o vyhodnocení okamžitého stavu objektu. Prognóza znamená určení vývoje tohoto stavu a jeho co nejpřesnější předpověď do budoucna. Poslední případ je geneze, ta určuje stav objektu v jistém časovém úseku v minulosti, nejčastěji před vznikem poruchy. [3]

Základními úkoly diagnózy jsou: [10]

Detekce: zjištění existence vznikající poruchy

Lokalizace: určení přesného místa vznikající poruchy

Specifikace: odhalení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením diagnostického signálu okamžitým stanovením a geneze po dobu provozu

Predikce: určení prognózy zbytkové životnosti pro účely strategického plánování a řízení údržby.

2.1 Rozdělení technické diagnostiky

Technická diagnostika lze rozdělit dle typu analyzovaných parametrů a měřených fyzikálních veličin na mnoho samostatných oborů. Ty nejpoužívanější jsou uvedeny v této kapitole.

2.1.1 Tribodiagnostika

Slovo tribo pochází z řeckého tribos a znamená tření. Věda zabírající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu se pak nazývá tribologie. Samotná tribodiagnostika využívá mazivo k získání objektivních informací o technickém stavu sledovaného objektu. [11]

2.1.2 Termodiagnostika

Termodiagnostika je vědní disciplína, která se zabývá určováním teploty. Mnoho poruch strojních zařízení je doprovázeno zvyšováním teploty, díky tomu je termodiagnostika schopna určit technický stav zařízení. [13]

Existuje několik metod termodiagnostiky. V praxi se nejčastěji vyskytuje dotykové měření, při kterém je teploměr v přímém kontaktu s měřeným zařízením a bezdotykové, které lze provádět z určité vzdálenosti.

Mezi nejpoužívanější dotyková zařízení na měření teploty patří dilatační skleněný teploměr. Funkce takového teploměru je založena na objemové roztažnosti použité kapaliny, obvykle rtuti. Rtuť se s rostoucí teplotou roztahuje tak, že její hladina stoupá v kapiláře k vyšším hodnotám na stupnici. Dalším zástupcem dotykových teploměrů je termoelektrický teploměr, který využívá Seebeckova jevu. Se změnou teploty dochází ke vzniku termoelektrického napětí mezi konci vodičů. V technické praxi se často vyskytují i odporové teploměry, které využívají závislosti elektrického odporu na teplotě. U kovů s rostoucí teplotou odpor roste, zjištěný odpor lze následně přepočítat na teplotu. [14]

2.1.3 Hluková (akustická) diagnostika

Hlukovou diagnostiku lze využít zejména ke zjištění netěsností a trhlin pneumatických obvodů, ke zjišťování intenzity hluku, které reprezentuje provozní režim stroje, v diagnostice lopatkových strojů a převodovek. [16]

Hluk je definován jako nežádoucí zvuk (20 Hz až 20 kHz) a může obsahovat i informace o technickém stavu objektu. Hluk se šíří kapalinou, pevnou hmotou a i vzduchem. Velkou nevýhodou této formy diagnostiky je vznik odrazů a interferencí, a to zejména v uzavřených prostorech. Další nevýhodou této metody jsou zdroje hluku ostatních zařízení, které komplikují lokalizaci hledaného zdroje hluku. [15]

Častým zdrojem hluku u točivých strojů jsou ložiska, převodovky, spalovací motory a kompresory, elektrické točivé stroje a transformátory. Většina těchto objektů je provázena emisí akustických vln v pásmu frekvencí 20 Hz až 20 kHz. Charakteristikou jednodušších zvuků je většinou harmonické kmitání prostředí. V praxi se často několik harmonických složek spojí ve složené zvuky. Hluk je širokopásmovým akustickým vlněním se spektrem složeným jak z diskrétních složek, tak i z části spojitě, dané impulsním hlukem. Vzájemným pohybem drsných, nepřesně opracovaných nebo opotřebených ploch v místě styku daných součástí vznikají mikroskopické silové impulsy a ty se podílejí na vytváření hluku. [15]

2.1.4 Elektrodiagnostika

Elektrodiagnostika je metoda využívající měření elektrického proudu, napětí a kvality elektrické energie. Nekvalita elektrické energie souvisí s výpadky výroby, což způsobuje nižší životnost stroje a energetické ztráty. [12]

2.1.5 Defektoskopie

Defektoskopie využívá nedestruktivní zkoušky materiálů k odhalení vnitřních a povrchových vad. Rozděluje se na povrchové a vnitřní metody.

Povrchové metody detekují trhliny a necelistvosti na povrchu a těsně pod povrchem. Mezi povrchové metody patří metody kapilární, elektrické (odporové), elektromagnetické (vířivé proudy), magnetické a teplotní. [15]

Vnitřní metody odhalují trhliny a necelistvosti uvnitř objektů, často uvnitř svarů. Jsou to metody ultrazvukové a prozařovací (záření rentgenovo, gama a tok neutronů) [15]

2.1.6 Vibrodiagnostika

Praktická část této diplomové práce se zaměřuje hlavně na vibrační diagnostiku, proto bylo toto odvětví technické diagnostiky popsáno v samostatné kapitole.

2.1.7 Multiparametrální diagnostika

Multiparametrální diagnostika kombinuje více metod technické diagnostiky, aby bylo možné objektivněji a spolehlivěji určit technický stav objektu. Použití pouze jedné metody technické diagnostiky nemusí vždy poskytnout dostatečné množství potřebných informací a odhalit vznikající závady. Z toho důvodu je výhodné brát technickou diagnostiku komplexně a daný objekt vyhodnocovat multiparametrickým přístupem. Tento přístup zvyšuje pravděpodobnost včasného odhalení vznikajícího problému a napomůže předejít poruše. Často se ve firmách používá současně vibrodiagnostika a termodiagnostika. [13]

3 VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA

Hlavním cílem sledování vibrací je získání informací o provozním a technickém stavu sledovaných rotujících strojů. Tyto informace jsou využity k zabezpečení strategického plánování a řízení údržby. [10]

Vibrace rotujících strojů jsou úzce vázány na dynamické namáhání. Většinou souvisejí se stavem ložisek, převodovek, nevývahou, nesouosostí, trhlinami v důležitých komponentech, opotřebením a dále. Proto vyhodnocení vibrací a nalezení příčiny vibrací patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky. [10]

Vibrační diagnostika je mnohem mladší než samotná diagnostika. V době, kdy se v průmyslu objevily první rotační součásti, vznikla i snaha o zesílení vibračního neboli hlukového signálu. Postupným zdokonalováním se vibrační diagnostika dostala do dnešní formy a používá nejmodernější měřicí techniku s maximální možnou vypovídající schopností o technickém stavu sledovaného objektu. Zlomem ve vývoji technické diagnostiky bylo nasazení informačních technologií, které umožnily vyhodnocovat signál v reálném čase.

Podle normy ČSN ISO 2041 jsou vibrace definovány jako mechanické kmitání kolem rovnovážné polohy. Tyto vibrace mohou být periodické i náhodné. [17]

Mechanické kmitání neboli vibrace jsou dynamickým jevem, při kterém hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem své rovnovážné polohy. [17]

Mechanické vibrace mají několik veličin a ty jsou dány budící silou, směrem této budící síly a kmitočtem. Vibrace lze vyobrazit amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. Vibrace tělesa jsou dány kombinací šesti pohybů, a to posunem v ortogonální soustavě souřadnic x , y , z a otáčením kolem těchto os. Tento mechanický systém má 6 stupňů volnosti. Majoritní část mechanického systému nekmítá jako jeden pevný bod, ale vznikají vlny. [1]

Vlna označuje šíření kmitů v prostoru a lze ji popsat jako změnu fyzikálního stavu nebo vlastnosti prostředí, šířící se tímto prostředím, při které dochází k přenosu energie, aniž by se dané prostředí přemístilo. [1]

3.1 Druhy kmitání

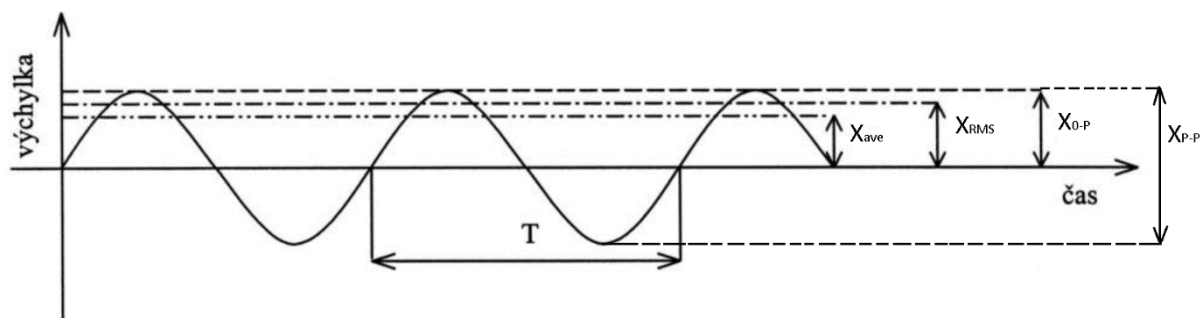
Mechanické kmitání je děj, při kterém daný objekt vykonává vratný pohyb kolem své rovnovážné polohy a při kterém je silové působení na tento objekt nulové. [1]

Kmitání tělesa je způsobeno budící silou působící na těleso interně, nebo externě. Rovnovážný stav nastane v případě, že síla působící na těleso bude mít nulovou hodnotu. [20]

Vibrace jsou charakterizovány dle časových změn veličin. Rozdělují se na periodické, a neperiodické.

3.1.1 Periodické kmitání

U tohoto typu kmitání se po stejné době, tedy po periodě, pravidelně opakuje stejný časový průběh. Nejjednodušším typem kmitání vůbec, je kmitání harmonické (obr 1). Harmonické vibrace obsahují jedinou frekvenci a jsou dány rovnicí (1). Závislost výchylky, rychlosti i zrychlení na čase má sinusový, respektive kosinusový průběh. Výhodou harmonického kmitání je, že stačí stanovit alespoň jednu ze tří základních veličin (výchylka, rychlost a zrychlení vibrací) a zbývající veličiny lze snadno dopočítat. [10]



Obr. 1) Příklad harmonického kmitání s vyznačením maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty [10]

Tab 1) Popis obrázku č. 1

Kota v obrázku	Popis
X_{P-P}	Hodnota špička-špička
X_{0-P}	Hodnota špičky [m]
X_{RMS}	Efektivní hodnota [m]
X_{ave}	Střední hodnota [m]
T	Perioda [s]

$$x(t) = X_{0-P} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

Kde: ω – úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

t – čas [s]

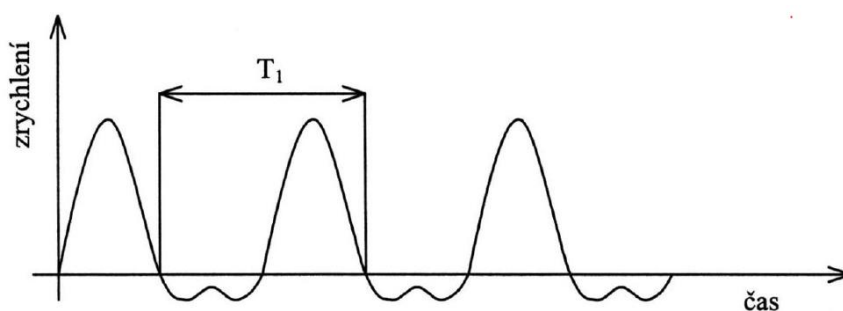
φ – fáze harmonické veličiny [rad]

K popisu harmonického signálu se však častěji používá střední hodnota výchylky vibrací (2) a efektivní hodnota výchylky vibrací (3).

$$X_{ave} = 0,637 \cdot X_{max} \quad (2)$$

$$X_{RMS} = 0,707 \cdot X_{max} \quad (3)$$

V technické praxi se s harmonickým kmitáním setkáváme jen velmi zřídka. Často však lze kmitání rotačních strojů vyjádřit jako součet harmonických sil. Složené vibrace jsou pak zakresleny jako superpozice různých časových průběhů (obr.2). Periodické vibrace vzniknou složením dvou a více harmonických vibrací. Periody těchto vibrací jsou dány racionálními čísly. [1]

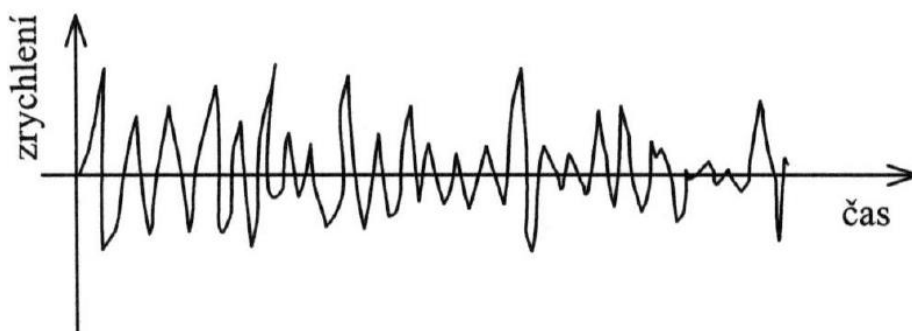


Obr. 2) Časový průběh složených vibrací [10]

3.1.2 Neperiodické kmitání

Neperiodické vibrace jsou někdy označovány také jako vibrace náhodné. Mohou vznikat složením vibrací, je-li poměr složek vyjádřen iracionálním číslem. V technické praxi se nejčastěji vyskytuje superpozice složených vibrací a vibrací náhodných. [1]

Charakteristikou náhodného kmitání je to, že se jeho průběh nikdy přesně neopakuje (obr 3). U náhodných procesů nelze předvídat průběh veličin jako výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací v každém časovém okamžiku tak, jako u dějů deterministických. Při diagnostice náhodně kmitajících soustav se využívá poznatků ze statistiky a harmonické analýzy. [10]



Obr. 3) Časový průběh náhodných vibrací [10]

Při zpracování signálů vibrodiagnostiky často šumová složka překrývá složený signál, který obsahuje důležitou diagnostickou informaci. Náhodné buzení je přítomné vždy, ovšem jen někdy je nutné ho uvážit při standardní diagnostice. Zcela náhodný vibrační signál může vzniknout například při turbulenci na křídle letadla. [1]

3.2 Základní veličiny popisující vibrace

Vibrace lze obecně popsat výchylkou, rychlostí nebo zrychlením společně s frekvencí a periodou. Tyto veličiny jsou navzájem matematicky provázány.

Doba trvání jednoho kmitu je perioda T [s] (4). Převrácená hodnota periody je frekvence f [Hz] (5): [19]

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5)$$

V rovnici 5 se vyskytuje veličina ω [rad·s⁻¹], úhlová frekvence. Tato veličina je vyjádřena vztahem (6): [18]

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

V počátečním čase $t = 0$ se nachází počáteční fáze φ_0 [rad]. Maximální možná výchylka, se nazývá hodnota špičky, nebo amplituda X_{0-P} [m]. Okamžitá výchylka vibrací $x(t)$ [μm] pro posuvné kmitání se vypočte podle rovnice 7: [18]

$$x(t) = X_{0-P} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (7)$$

Výchylka je podle normy ČSN ISO 2041 definována jako časově proměnná veličina popisující změnu polohy bodu na tělese vzhledem k referenční soustavě souřadnic. [17]

Derivací okamžité výchylky podle času se odvodí rovnice pro okamžitou rychlost vibrací $v(t)$ [mm/s] (8): [18]

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X_{0-P} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

Rychlost vibrací je podle normy ČSN ISO 2041 definována jako rychlost, se kterou se mění výchylka vibrací. Jedná se o časově závislou veličinu. [17]

Derivací okamžité rychlosti vibrací podle času se vypočte rovnice pro okamžité zrychlení vibrací $a(t)$ [mm/s²; g] (9). Zrychlení vibrací se vyjadřuje buď to v milimetrech za sekundu na druhou nebo v násobcích tíhového zrychlení g. [18]

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X_{0-P} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (9)$$

Zrychlení vibrací je dle normy ČSN ISO 2041 definováno jako rychlost, se kterou se mění rychlosti vibrací. Jedná se o časově závislou veličinu. [17]

Střední hodnotu výchylky vibrací (10), rychlosti vibrací (11) a zrychlení vibrací (12) vyjadřují rovnice: [18]

$$X_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| \quad (10)$$

$$v_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| \quad (11)$$

$$a_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T |a(t)| \quad (12)$$

Efektivní hodnota neboli RMS hodnota, je významná tím, že obsahuje informaci o výkonu kmitání. Někdy se tato veličina nazývá také střední kvadratickou hodnotou a je důležitým měřítkem k určení nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Efektivní hodnotu výchylky vibrací (13), rychlosti vibrací (14) a zrychlení vibrací (15) lze vypočíst podle rovnic: [18]

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (13)$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (14)$$

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (15)$$

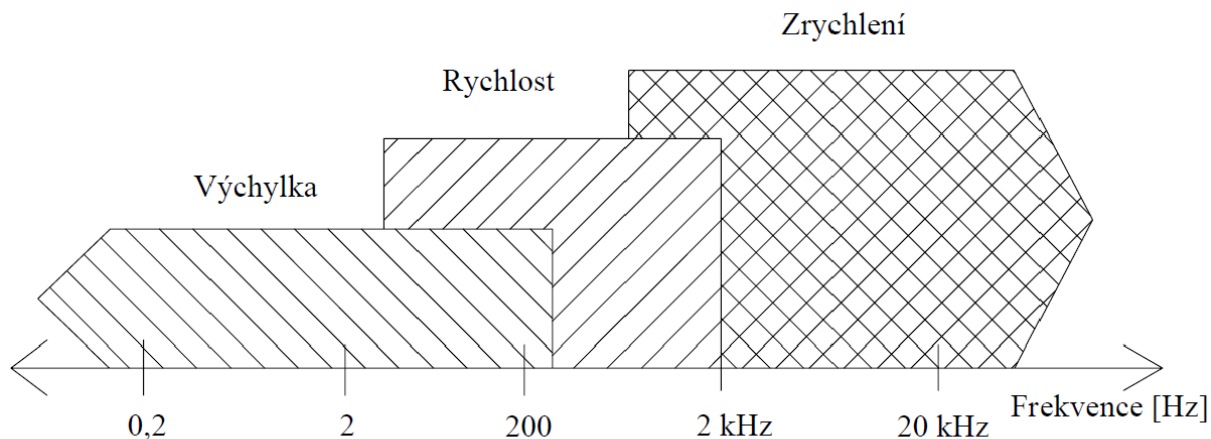
Z těchto popisů je patrné, že teoreticky stačí znát jen jednu z těchto veličin a zbývající lze snadno dopočíst. Ale skutečnost je taková, že měření každé jednotlivé veličiny je vhodné pro jinou situaci.

Výchylkou vibrací se měří nízké frekvence (0 Hz – 500 Hz).

Rychlost kmitání se využívá při nízkých a středních frekvencích (10 Hz – 2000 Hz) a identifikuje poruchy nacházející se při těchto frekvencích. Mezi časté poruchy v těchto frekvencích patří nesouosost a nevyváženost.

Zrychlení vibrací se využívá při vysokých frekvencích (1000 Hz – 50 000 Hz) a identifikuje poruchy, které se projevují v těchto frekvencích. Typickým příkladem takovýchto poruch jsou poruchy na valivých ložiscích.

Při volbě měřené veličiny je nutno vzít v úvahu nepříznivé vlivy působící na přesnost měření. Takovýmto nepříznivých vlivem může být šum. Šum je přítomný v každém měření. Nejvíce se projevuje u slabých signálů, kde může způsobit velké nepřesnosti. Technická praxe prokázala, že při volbě měřené veličiny je klíčový frekvenční rozsah. Doporučený rozsah těchto frekvencí je znázorněn na obrázku 4.



Obr. 4) Výběr vhodné veličiny dle frekvence [20]

3.3 Snímače vibrací

Původně se vibrace na rotačních strojích snímali hmatem nebo sluchem, postupem času se vyvinuly sofistikované a propracované přístroje, díky kterým je možné měřit vibrace s velkou přesností a efektivností.

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejvěrněji odpovídat skutečnému průběhu mechanického kmitání. [10]

Existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu, a to seismická zařízení a snímače relativní výchylky. Seismická zařízení se montují na konstrukci stroje a jejich výstupem jsou absolutní vibrace konstrukce. Snímače relativní výchylky umožňují měřit střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy. Při jistých typech měření se používají i tenzometry, jejich použití při monitorování stavu vibrací je velmi neobvyklé. [10]

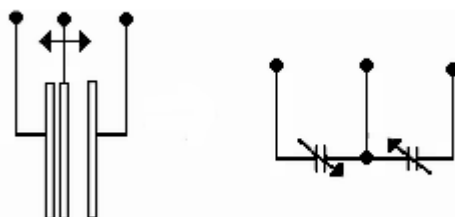
Výběr odpovídajících snímačů závisí na měřené veličině vibrací, a na tom, zdali měříme absolutní nebo relativní vibrace, zda provádíme měření nízkofrekvenčních nebo běžných vibrací a podobně.

3.3.1 Snímače MEMS

Snímače vibrací MEMS patří spolu s akcelerometry mezi nejpoužívanější snímače v oboru. Zkratka MEMS znamená mikro elektro mechanický systém a označuje samotnou technologii výroby, ale i o produkty pomocí ní vyrobené. Snímače MEMS se skládají ze čtyř částí umístěných na křemíkovém základu, a to z mikro snímačů, mikro akčních členů, mikro elektroniky a mikro struktury. Vyrábí se pomocí mikro obráběcích procesů, které vyleptávají části křemíkového základu, nebo přidávají další vrstvy, čímž vytváří mechanická nebo elektromechanická zařízení.

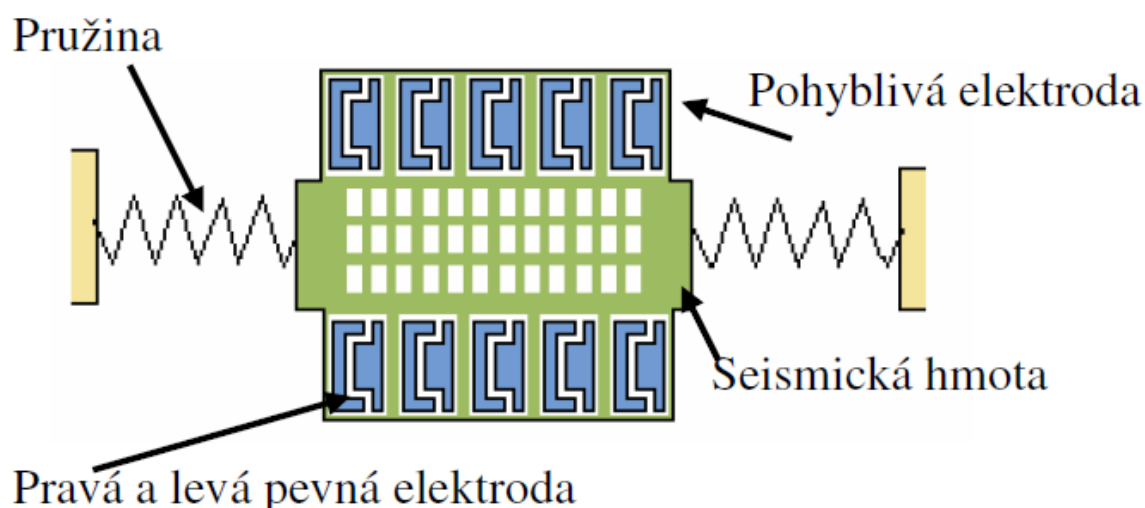
Funkce akcelerometrů MEMS je založena na proměnné kapacitě vzduchového kondenzátoru se třemi deskami (obr. 5). Jedna z desek kondenzátoru je pohyblivá a její pohyb

závisí na působícím zrychlení. Hlavním úkolem je zajistit dostatečně citlivý převod zrychlení na mechanický posuvný pohyb, který určuje výsledný měřicí rozsah MEMS akcelerometru.



Obr. 5) Kondenzátory MEMS akcelerometru zdroj popisek [27]

Základem je druhý Newtonův zákon, který říká že síla se rovná násobku hmotnosti a zrychlení. Kde síla, vyvolána zrychlením působícím na seismickou hmotu, pomocí pružin zajistí posuv nosníku (obr. 6). Tato struktura akcelerometru umožní měření zrychlení pouze v jednom směru. V případě, že je zapotřebí měřit ve dvou směrech, je nutné na chip přidat totožnou strukturu, která je otočená o 90° proti původní struktuře.



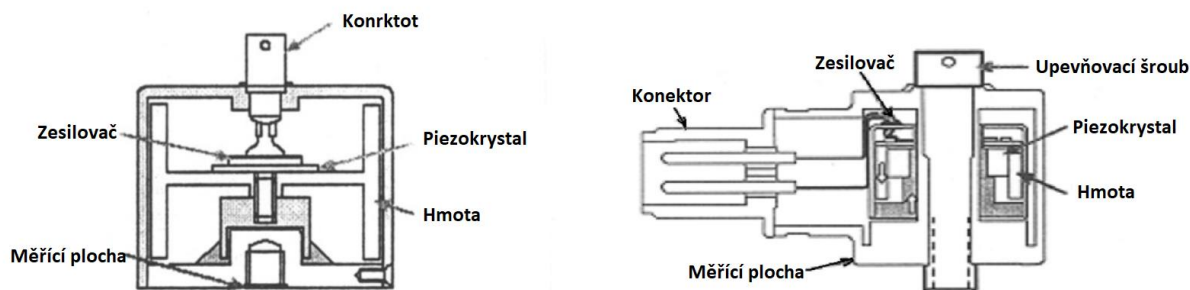
Obr. 6) Znázornění mechanické struktury MEMS zdroj a popisek [27]

3.3.2 Akcelerometr

Nejrozšířenějším typem snímače vibrací jsou akcelerometry. Výstup akcelerometrů může být zpracován tak, aby zobrazoval libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylka vibrací). Akcelerometr patří do skupiny seismických zařízení. Generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Akcelerometry se obecně montují na stacionární, tedy nerotující konstrukci strojů. Doporučuje se, aby lineární rozsah montovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence stroje. Akcelerometry jsou dostupné s různými rezonančními frekvencemi od 1000 Hz výše. Je obvyklé integrovat signál akcelerometru tak, aby výstupem byla rychlost. Je však nutné dávat pozor při dvojnásobné integraci na výchylku vibrací, a to zejména při nízkých frekvencích. [10]

Existuje široká škála dostupných akcelerometrů různých velikostí o dynamickém rozsahu a s širokým frekvenčním rozsahem. Přednostně se používají na malé objekty s malou montážní plochou, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. [10]

Akcelerometr obsahuje podle typu konstrukce jeden nebo více piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal slouží k vytvoření elektrického náboje přímo úměrného působící síle. Podle umístění piezoelektrického krystalu a podle hmoty ve snímači dělíme akcelerometry na dva základní druhy, a to akcelerometr tlakový a smykový (obr. 7). [10]



Obr. 7) Schéma tlakového akcelerometru (vlevo) a smykového akcelerometru (vpravo) [10]

3.3.3 Snímač rychlosti

Snímače rychlosti vibrací je seismické zařízení generující napěťový signál přímo úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Jeho signál lze integrovat na výchylku vibrací. Snímače rychlosti vibrací se obecně montují na stacionární, tedy nerotující konstrukci tělesa. Snímač rychlosti vibrací má uvnitř sebe cívku a permanentní magnet. Princip měření je založen na měření kmitavých pohybů měřicí cívky, která se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seismickou hmotu snímače. V cívce se při kmitání indukuje elektromotorická síla úměrná rychlosti vibrací. [10]

V současné době již každý snímač obsahuje digitální zpracování a vyhodnocení signálu. K měření vibrací je obvykle spolehlivější a odolnější integrovaný senzor zrychlení, tedy akcelerometr. S elektrodynamickým principem se lze setkat jen zřídka a rychlost kmitavého pohybu se dnes většinou určuje integrací zrychlení z akcelerometrů. [21]

3.3.4 Snímač výchylky (polohy, posunutí)

Snímač výchylky kmitajícího tělesa využívá princip indukční, indukčnosti, kapacitní, magnetický nebo optický. Vibrodiagnostika nejčastěji využívá snímače založené na indukčnostním principu. Tyto snímače využívají závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Jedná se o snímače citlivé na parazitní vlivy, jako jsou délka kabelu, vnější elektromagnetické pole a podobně. Proto se tyto snímače vyrábějí jako integrované, kdy kovový stínící kryt obsahuje spolu s cívkou i základní část elektroniky. V poslední době se využívají i bezdotykové optické snímače výchylky. Tyto snímače sice neovlivňují měřený objekt, ale do měření zanáší několik dalších zdrojů nejistot měření. [21]

3.3.5 Umístění a přichycení snímačů

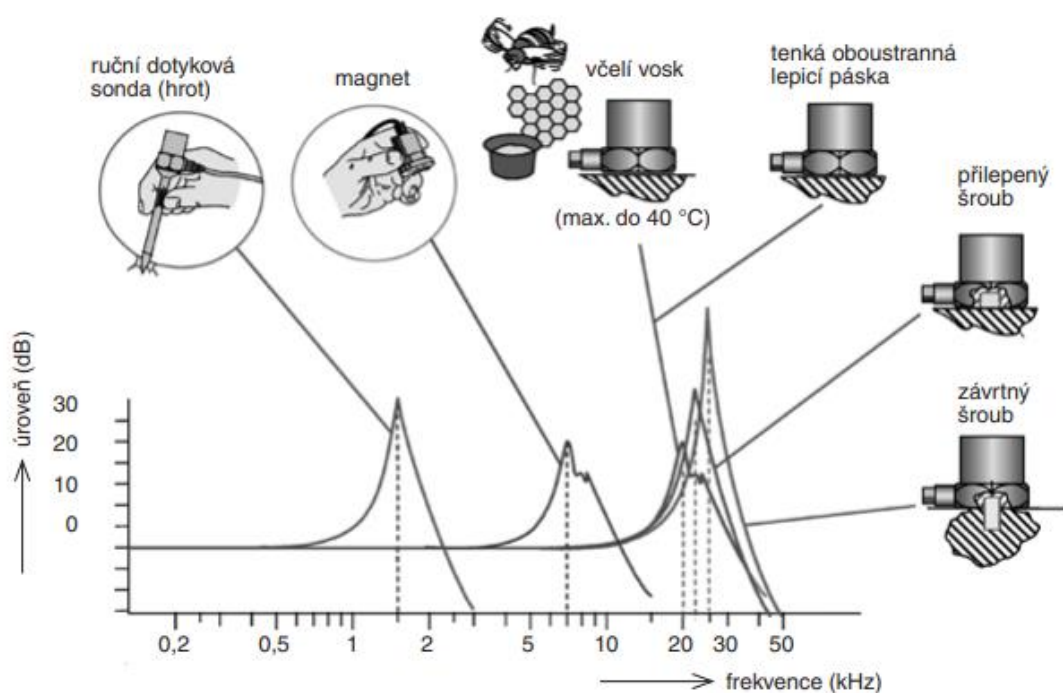
Důležitou součástí měření je správné umístění a montáž snímače. Ta závisí na konkrétním stroji a parametrech, které mají být měřeny. Vždy je vhodné umístit snímače v blízkosti ložisek. Nevhodně umístěný nebo upevněný snímač může způsobit znehodnocení naměřených dat nebo omezit použitelný frekvenční rozsah snímače. [20]

Problematikou uchycení akcelerometrů se zabývá norma ČSN ISO 5348: Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů. Tato norma je určena pro absolutní snímače.

Norma uvádí, že snímače musí být umístěny na očištěné a vhodné místo. Připevňovací charakteristiky akcelerometrů musí být stanoveny výrobcem. [23]

Způsob upevnění snímače má nezanedbatelný vliv na frekvenční rozsah, ve kterém lze vibrace měřit. Obrázek 8 popisuje vliv způsobu uchycení na amplitudu ve frekvenční charakteristice. Nejmenšího ovlivnění frekvenční charakteristiky a maximálního využití frekvenčního rozsahu zajistí upevnění snímačů závrtnými šrouby. V ideálním případě vylepšené o tenkou vrstvu silikonové vazelíny mezi styčnými plochami. Dobrého frekvenčního rozsahu lze dosáhnout i připevněním speciálními lepidly, nebo včelím voskem. Mezi nejproblémovější snímače patří ty, které se uchycují ručním hrotem, nebo magnetickou příchytou. Tyto snímače ale mají svůj nezastupitelný význam při hledání vhodného měřicího místa. [22]

Podobný význam jako uchycení má i správná volba místa pro instalaci snímače. Hlavně u absolutních snímačů je zapotřebí volit taková místa, aby tuhost a pružnost konstrukce částí vyhodnocovaného stroje nezkreslila chvění nebo frekvence. [22]



Obr. 8) Vliv způsobu uchycení na amplitudovou ve frekvenční charakteristice [22]

4 POUŽITÝ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

Diagnostický systém se skládá z objektů diagnostiky, snímačů vibrací a teplot, z výpočtové techniky, která zpracovává data, z měřících přístrojů, z databáze a ze zvolené metodiky měření a vyhodnocování.

Objekty diagnostiky se všemi měřícími body jsou popsány v kapitole 6 Papírenský stroj a měřící body. Zde jsou měřící body zařazeny podle diagnostikovaného objektu. Měřící body jsou také popsány v příloze 1, ve které jsou seřazeny podle měřící databáze.

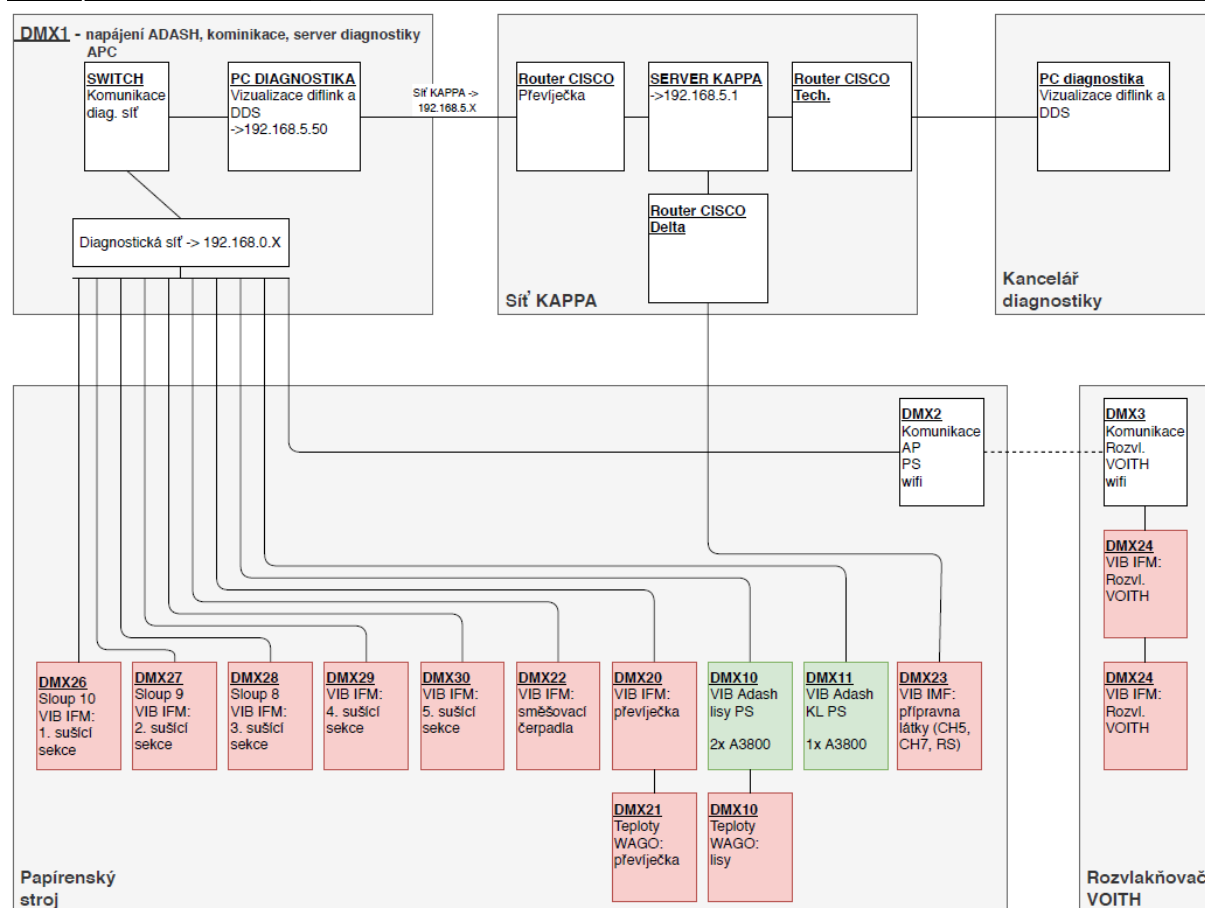
Zvolené metodiky jsou popsány v kapitole 7 Metody pro měření a vyhodnocení vibrací papírenského stroje.

V současné době ve firmě Smurfit Kappa Morava Paper neexistuje ucelený systém vibrační diagnostiky papírenského stroje. Základním stavebním kamenem diagnostiky papírenského stroje je online monitorování vibrací a teplot nejdůležitějších komponent, které je vyvedeno do dvou softwarů pro diagnostiku a vizualizaci. Jedná se o původní program Diflink od firmy Dif a nový program DDS od firmy Adash. Toto hlavní online měření je doplněno pochůzkovým měřením sušících válců ze strany obsluhy a pohonů papírenského stroje, které je prováděno jednou měsíčně firmou Dif. Posledním článkem diagnostického systému je pochůzka prováděná samotnou firmou Smurfit Kappa Czech, ve které si firma sama hlídá méně důležitá zařízení, jako jsou například menší čerpadla nebo ventilátory. Pochůzková měření jsou prováděna přístrojem Adash A4400 VA4Pro II a následně vyhodnocována v softwaru DDS.

Všechny měřící body všech 4 základních stromů databáze diagnostického systému jsou uceleně popsány v příloze (1). Pro účely této práce byly měřící body ze 4 základních databází rozděleny barevně dle tabulky 2. Tabulka 2 popisuje rozdíl mezi stavem diagnostického systému před upgradem a po něm.

Tab 2) Barevné odlišení databází a přehled rozdílu mezi starým a novým diagnostickým systémem

Databáze	Starý diagnostický systém	Nový diagnostický systém
DIFLINK online	Plně funkční	Plně funkční
DDS online	Neexistuje	Plně funkční
Pochůzkové měření Dif	Funkční, ale neefektivní. Měření se provádí přístrojem microlog a poté je nahráváno do softwaru Prism.	Plně funkční. Měření se provádí systém VA4 Pro II. Doba měření je zkrácena 4x. Měření se snadno nahrává do softwaru DDS, který umožňuje rychlé vyhodnocení dat.
Pochůzkové měření SKMP	Funkční, ale neefektivní. Měření se provádí přístrojem microlog a poté je nahráváno do softwaru Prism.	Plně funkční. Měření se provádí systém VA4 Pro II. Doba měření je zkrácena 4x. Měření se snadno nahrává do softwaru DDS, který umožňuje rychlé vyhodnocení dat.



Obr. 10) Nová hierarchie online diagnostické sítě v závodu SKMP [25]

4.1.1 Diflink online

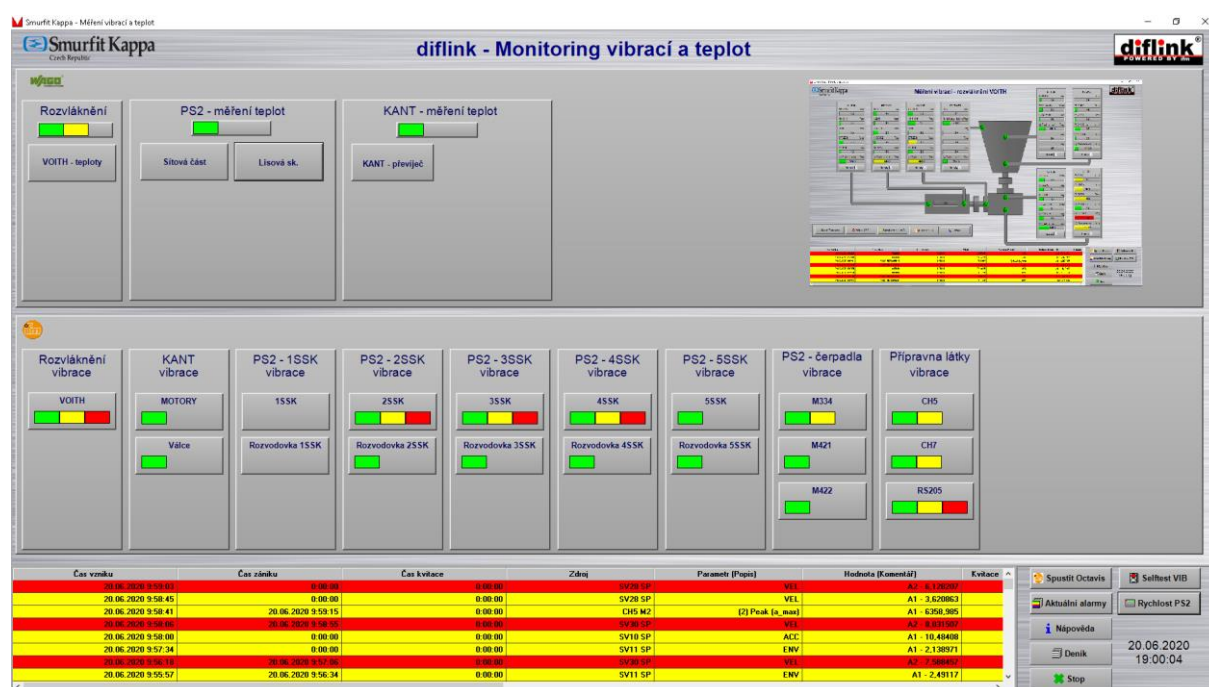
Jedná se o systém nabízející možnost monitorování vibrací, teplot a jiných procesních veličin. Vyhodnocování je prováděno přímo na stroji, tím se redukuje podstatné množství přenášených dat. Diflink je trvale spojen se snímači vibrací. Lze jej spojit s piezoelektrickými akcelerometry a se snímači MEMS. Signál se pomocí výkonné elektroniky s digitálním signálním procesorem zpracovává pomocí FFT transformace. Výsledkem jsou frekvenční spektra, stav jednotlivých diagnostických parametrů. K měření teplot jsou využity odporové snímače PT1000/PT100. Výstupy jsou vyvedeny do jednotného vizualizačního prostředí SCADA PROMOTIC, které je k dispozici v celém intranetu podniku. Hlavní strana zobrazuje měřené stroje se stavovými semaforem značícími provoz, výstrahu a nebezpečí. Dále hlavní strana ukazuje měřené veličiny (rychlost stroje, teploty, tlaky) a alarmový žurnál. Další úroveň programu pak obsahují měřené parametry včetně trendů a technické dokumentace jednotlivých strojů. Jelikož Diflink samotný slouží jako ukazatel aktuálních hodnot, v případě že se hodnoty vibrací dostanou mimo meze, blikne červený alarm, který upozorní na problém. Pro podrobnou analýzu spekter a trendů je Diflink přímo napojen na software Efactor Octavis ves003. [25]

Diflink (obr. 10) je původní vibrodiagnostický systém, který v závodě SKMP funguje mnoho let a měří ty nejdůležitější části papírenského stroje mezi které patří rozvlákňovač, převijec, část mokré části PS, část sušící části PS, tři nejdůležitější čerpadla a třídiče a separátory v přípravě látky. Online monitorování klíčových komponent papírenského stroje a dalších zařízení nezbytných pro chod papírny v kombinaci s pochůzkovým přístrojem microlog vytvářely dostatečný základ diagnostiky papírenského stroje pro řadu let. S nástupem

nových technologií bylo třeba systém rozšířit o další měřicí body. Online monitorování vibrací a teplot je stále funkční, a proto se měření v softwaru Diflink zachovalo. Nové online snímače však byly napojeny na novější software DDS a přístroj Microlog byl nahrazen Adashem A4400 VA4 Pro II.

Všechny měřicí body zobrazeny v Diflinku online a použity v této diplomové práci jsou zvýrazněny světle oranžovou barvou. Všechny měřicí body zobrazeny v Diflinku online jsou v příloze 1.

Všechna měření vevedena do Diflinku jsou ověřená léty praxe, a proto bude tato část diagnostického systému papírny popsána pouze teoreticky. Praktická část se zaměření na nový systém DDS.



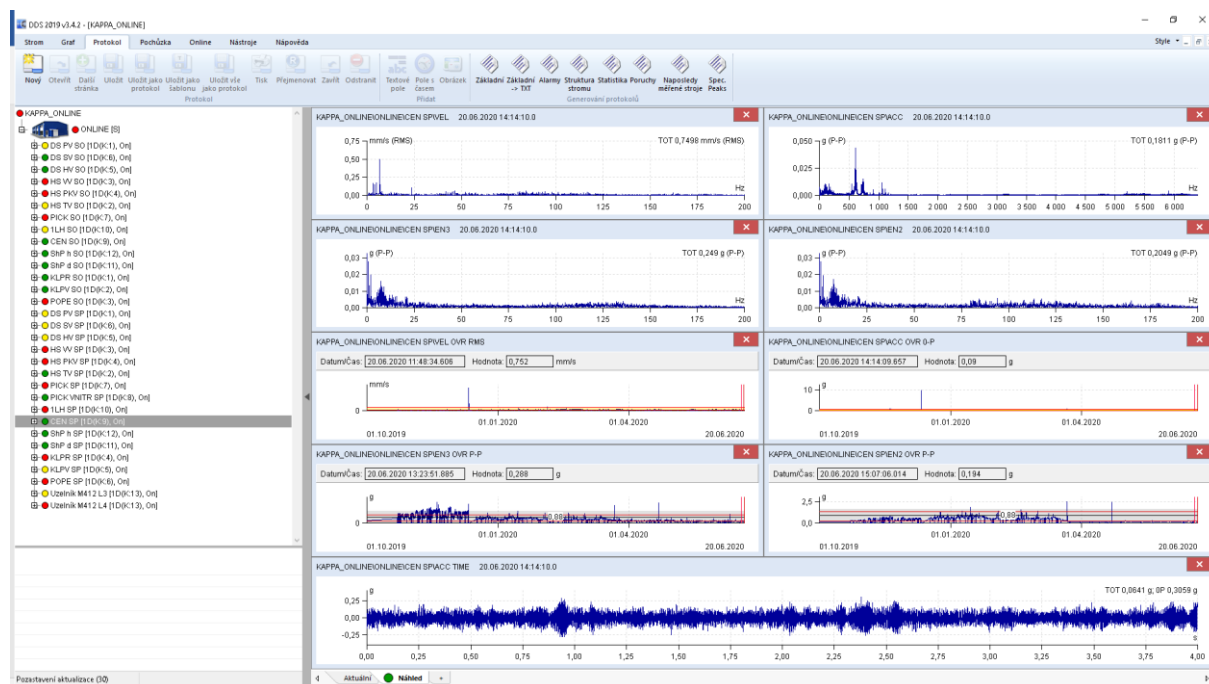
Obr. 11) Přehled všech monitorovaných sekcí a zařízení Diflinkem s detailem na měření vibrací rozvláknovače [25]

4.1.2 DDS online

K vyhodnocování dat v praktické části této diplomové práce byl využitý nový softwarový systém DDS (obr. 12) od firmy Adash. Jedná se o velmi výkonný nástroj pro sběr, archivaci a vyhodnocení dat v oblasti vibrační a technické diagnostiky strojů. Tento systém obsahuje veškeré nástroje a funkce, které jsou potřebné pro analýzu signálu ve frekvenční a časové oblasti. Systém umožňuje připojení on-line i off-line měřících a monitorovacích systémů. Systém DDS plně podporuje pochůzková měření. [24]

DDS umožňuje velmi rychlé vytváření textově i graficky přehledných protokolů z provedených měření. V systému DDS lze nastavit hranice alarmů, které umožňují rychlé zjištění provozního stavu strojů. Tento systém je plně kompatibilní se všemi vibrodiagnostickými přístroji a on-line systémy firmy Adash. [24]

Všechny měřící body patřící do sekce DDS online a použity v této diplomové práci jsou zvýrazněny světle zelenou barvou. Všechny měřící body DDS online jsou v příloze 1.



Obr. 12) DDS online s detailem na měření ložiska centrálního válce na straně pohonu

4.2 Pochůzkové měření

Pochůzkové měření je prováděno přístrojem Adash A4400 VA4 Pro II a vyhodnocováno v softwaru DDS. Pochůzka samotná je rozdělena do dvou částí, z nichž každou má na starosti jiná firma. První část pochůzky DDS pochůzka Dif provádí firma Dif a druhou část pochůzky DDS pochůzka SKMP provádí diagnostik samotné firmy Smurfit Kappa Czech s.r.o.

4.2.1 Adash A4400 VA4 Pro II

K pochůzkovému měření byl použit přístroj A4400 VA4 Pro (obr. 13) od firmy ADASH. Jedná se o přístroj pro provádění měření v oblasti vibrační diagnostiky strojů. Přístroj obsahuje základní moduly analyzátoru, detektoru a rekordéru měřených signálů. Dále je přístroj vybaven moduly pro provozní vyvažování strojů, měřením rozběhů a doběhů, ultrazvukem, akustickým měřením, rázovými testy, kontrolou mazání, poslechem vibračního signálu a modulem provozních tvarů kmitů. Přístroj obsahuje zcela unikátní expertní systém, vyvinutý přímo firmou Adash, pro automatickou detekci poruch strojů. [24]

Parametry přístroje: [24]

- Frekvenční rozsah
 - maximální rozsah: 1 Hz - 90 kHz (1 Ch, 194 kHz vzorkování)
 - maximální rozsah: 1 Hz - 25 kHz (4 Ch, 64 kHz vzorkování)
 - minimální rozsah: 1 Hz - 25 Hz (4 Ch, 64 Hz vzorkování)
- Rozlišení FFT, tedy rozlišení případných blízkých frekvencí. Čím větší počet čar, tím detailnější rozlišení.
 - minimální počet čar: 100
 - maximální počet čar: 3 279 800
- Zpracování dat
 - FFT v reálném čase
 - DEMOD - Envelope (obálková analýza)
 - ACMT analýza pomaloběžných ložisek



Obr. 13) A4400 VA4 Pro II [24]

4.2.2 Pochůzkové měření Dif

Toto pochůzkové měření DDS pochůzka Dif se provádí dvakrát do měsíce. Pracovník firmy Dif navštíví závod Smurfit Kappa Morava Paper a provede sérii měření hlavních pohonů papírenského stroje a sušících válců na straně obsluhy. Toto měření vyhodnotí a data uloží do předem připravených protokolů. Do protokolů dále vloží data z online měření o to jak ze softwaru Diflink tak z DDS a výsledný protokol zašle firmě Smurfit Kappa, kde ho technik zodpovědný za diagnostiku papírenského stroje zkontroluje a předá managerovi údržby.

Všechny měřící body patřící do pochůzky DDS pochůzka DIF a použity v této diplomové práci jsou zvýrazněny světle modrou barvou. Všechny měřící body DDS pochůzka DIF jsou v příloze 1.

4.2.3 Pochůzkové měření SKMP

Nejdůležitější zařízení jsou monitorována online, další důležitá zařízení jsou hlídána expertní firmou Dif, viz DDS pochůzka Dif. Ostatní zařízení, na které nezbylo v rozpočtu místo pravidelně kontroluje technik údržby zodpovědný za diagnostický systém papírenského stroje. Ten provádí měření všech těchto zařízení minimálně jednou do měsíce a na konci každého měsíce odevzdá vyhodnocený protokol svému nadřízenému.

Všechny měřící body patřící do pochůzky DDS pochůzka SKMP a použity v této diplomové práci jsou zvýrazněny světle žlutou barvou. Všechny měřící body DDS online jsou v příloze 1.

5 PAPIRENSKÝ STROJ A MĚŘÍCÍ BODY

Papírenský stroj, je definovaný jako stroj pro výrobu papíru a kartonů, do něhož na jedné straně natéká papírovina a na straně druhé se do kotoučů navijí hotový papír nebo karton. Rozděluje se na konstantní část, ta zahrnuje vše od strojní kádě po nátok, a na vlastní papírenský stroj, ta zahrnuje vše od nátoku až k navíječi. [6]

Papírenský stroj ve závodě Smurfit Kappa Morava Paper, dále jen SKMP, vyrábí papír na výrobu vlnité lepenky. Tento typ papíru se skládá ze dvou základních vrstev. Z krycí vrstvy, dále jen KV a ze základní vrstvy, dále jen ZV.

5.1 Příprava papírové hmoty

Než se papírová hmota dostane k samotnému papírenskému stroji, projde řadou úprav a procesů. Nejdříve je surový materiál rozvlákněn a poté projde řadou technologických procesů na přípravné látky. Téměř celá papírna je složena jako sériový systém. To znamená, že většina poruch jakéhokoli systému způsobí zastavení provozu. Proto jsou klíčové prvky všech systému monitorovány.

K výrobě papíru lze využít několika materiálů.

5.1.1 Suroviný na výrobu papíru

Základní surovinou pro výrobu papíru bývá nejčastěji smrkové dřevo. Z něj se později získává: [4]

Bílá dřevní drť – Získává se drcením půlmetrových polen, které jsou již zbaveny kůry a následným přetříděním, kdy se odstraní nežádoucí větší třísky. Tato drť je složena z krátkých vláken. Papíry vyrobené z toho materiálu na vzduchu rychle žloutnou. Jedná se o nejméně kvalitní materiál vhodný pro méně náročné papíry, například pro papír novinový.

Hnědá dřevní drť – Před drcením se polena nechávají minimálně tři hodiny pařit, což způsobí protažení a zpevnění vláken. Dřevo dále získává tmavě hnědou barvu. Papíry z tohoto materiálu mají také hnědou barvu. Slouží k výrobě krabicové lepenky nebo k balicímu papíru.

Celulóza – Je vyráběna ze dřeva jehličnatých stromů chemickou cestou. Dřevo je nejdříve rozdrceno a následně vyvařeno v roztoku sulfitového louhu nebo jiného činidla. Vaří se 5-6 hodin při tlaku 0,05-1 MPa. To způsobí uvolnění dřevěných vláken, rozpuštění ligninu a zůstane pouze celulóza. Vlákná tohoto materiálu jsou delší a dají se bělit. Využívá se k výrobě psacích a kreslicích kartonů, ilustračních, kopírovacích a křídových papírů.

Mnoho papíren však vyrábí papír výhradně ze sběrového papíru. Ten musí splňovat požadavky normy ČSN EN 643: 2014. Sběrový papír, nebo též starý použitý papír, je papír a lepenka, který byl již použit, ale zachoval si vlastnosti dostačující k tomu, aby se z něj mohla regenerovat papírenská vlákna v použitelné formě. Taková vlákna se pak nazývají regenerované vlákniny, nebo také sekundární vlákniny, sekundární vlákna. [4]

Tato diplomová práce se dále soustředí právě na typ papírny používající ke své výrobě sběrový papír.

5.2 Smurfit Kappa

Společnost Smurfit Kappa je první v Evropě ve výrobě vlnité lepenky, hladké lepenky a obalů Bag – In – Box a je jediným panamerickým výrobcem hladké lepenky a obalů z vlnité lepenky.

Vlastní 350 výrobních závodů po celém světě ve 21 zemích Evropy a ve 12 zemích Severní a Jižní Ameriky.

Tato diplomová práce byla zpracována v závodu společnosti Smurfit Kappa Czech s.r.o. s názvem Smurfit Kappa Morava Paper.

5.2.1 Smurfit Kappa Morava Paper

Jedná se o závod společnosti Smurfit Kappa Czech s.r.o. který se soustředí na výrobu vlnité lepenky. Papírna má velmi bohatou historii. Byla vybudovaná panem Carlem Weissshuhnem a uvedena do provozu byla v 29.8.1891. Její výstavba trvala málo přes jeden rok, a to i přes to, že k papírně vede 3,6 km dlouhý náhon, který je vybudován ve skalnatém terénu. Ten původně sloužil k plavení dříví pro výrobu papíru a jako zásobárna vody pro papírnu. Dnes však papírna vyrábí pouze ze sběrového papíru.

Žimrovské papírny několikrát změnily majitele, než se dostaly do vlastnictví společnosti Smurfit Kappa.

V době vybudování papírna zvládla vyrobit 8 tun papíru denně, dnes se výroba vyšplhala i přes 230 tun denně.

Následující popis papírenského stroje se vztahuje konkrétně k papírenskému stroji v žimrovské papírně Smurfit Kappa Morava Paper.



Obr. 14) Závod Smurfit Kappa Morava Paper a logo firmy [8]

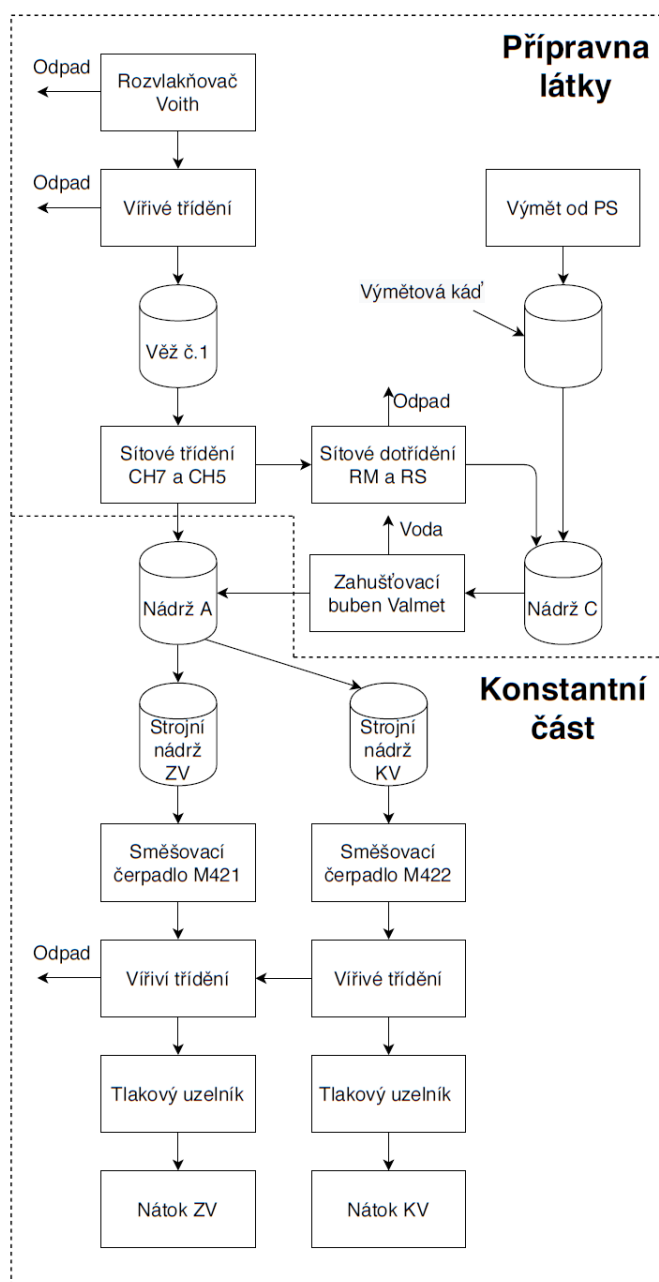
5.3 Přípravná látka a konstantní část papírenského stroje

Mezi základní úkoly přípravy látky, dále jen PL, patří přivést suroviny do čerpatelného stavu, vyčistit látku od nežádoucích příměsí a dopravit látku na nátok papírenského stroje.

Konstantní část se skládá z čerpací kádi s papírovinou, čistícího zařízení, ředícího zařízení a z nátoku. Nátokem se suspenze v rovnoměrné vrstvě přivádí na síto papírenského stroje. [5]

Jak už bylo řečeno, papírenský stroj v závodu SKMP vyrábí dvouvrstvý papír. To znamená, že na sebe pokládá dvě různé kvalitní vrstvy papírové hmoty, a to krycí vrstvu a vrstvu základní.

Na obrázku 15 je zjednodušené schéma přípravy látky a konstantní části papírenského stroje. Monitorované části tohoto schématu jsou dále detailněji popsány i s měřícími body.

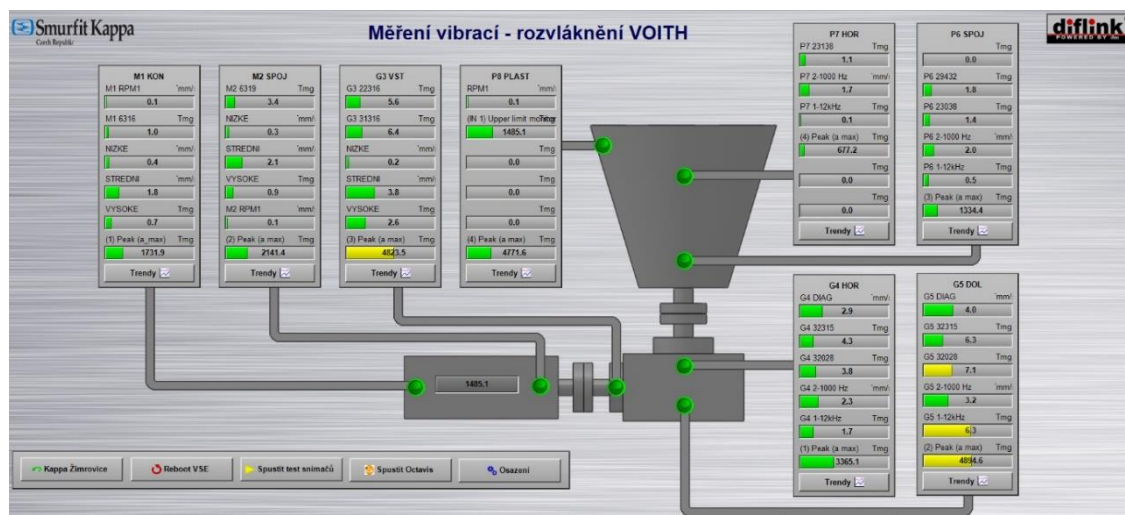


Obr. 15) Schéma konstantní části papírenského [8]

5.3.1 Rozvlákňovač Voith

Sběrový papír uskladněný na skládce sběrového papíru je pomocí vysokozdvížného vozíku položen na pásový dopravník, který papír vynese do rozvlákňovače. Zde dochází ke smíšení papíru s vodou a jeho rozvlákňování na papírovou hmotu.

Na rozvlákňovači Voith je celkem 8 měřících bodů na kterých jsou monitorovány vibrace a teploty. Tyto body jsou zapsány a rozříděny v tabulce 3.

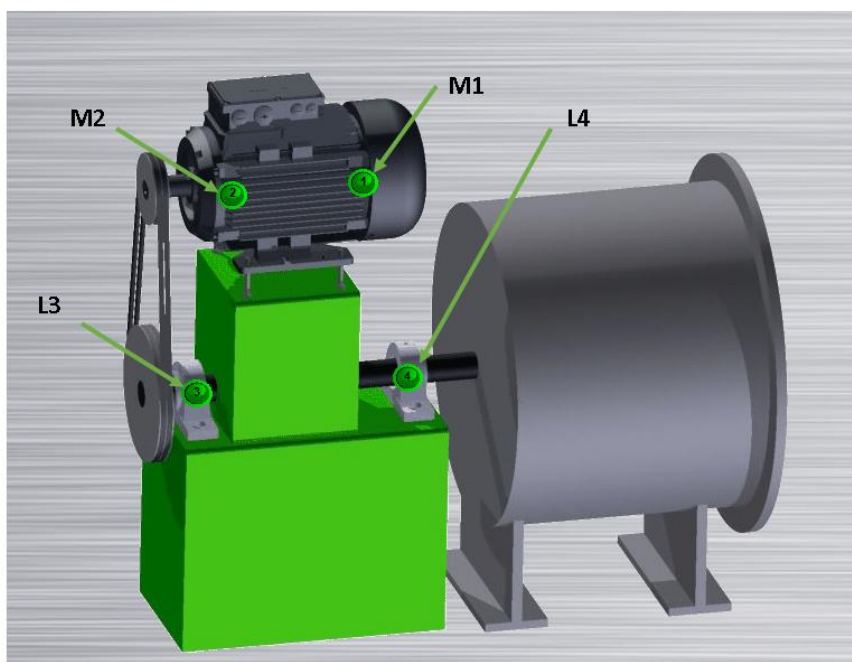


Obr. 16) Schéma rozvlákňovače Voith s měřícími body (Diflink) [25]

5.3.2 Sítové třídiče CH5 a CH7

Sítové třídiče CH5 a CH7 slouží k oddělení papírové hmoty od nezpracovatelných materiálů, jakými mohou být například plasty nebo kovy.

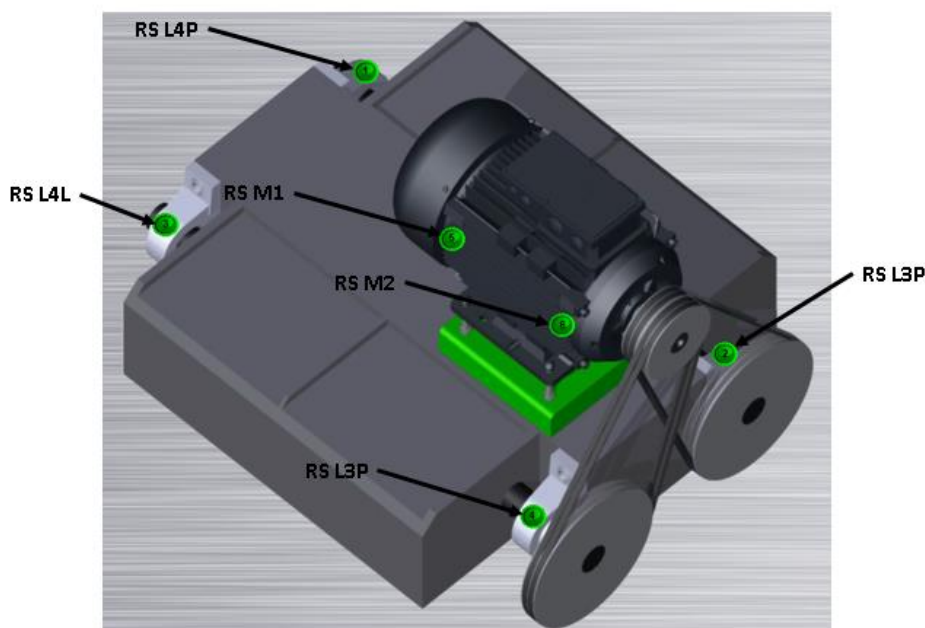
Na sítových třídících jsou monitorovány 4 měřící body, které jsou zobrazeny a rozříděny v tabulce 3.



Obr. 17) Schéma měřících bodů sítových třídičů CH5 a CH7 (Diflink) [25]

5.3.3 Sítový třídič RS 205

Sítový třídič RS 205 slouží k dotřídění odpadního materiálu a znovuzískání suroviny pro výrobu papíru. Odpadní materiál částečně odvodňuje. Na sítovém třídiči RS 205 je celkem 6 měřících bodů na kterých jsou monitorovány vibrace. Tyto body jsou uvedeny a roztrženy

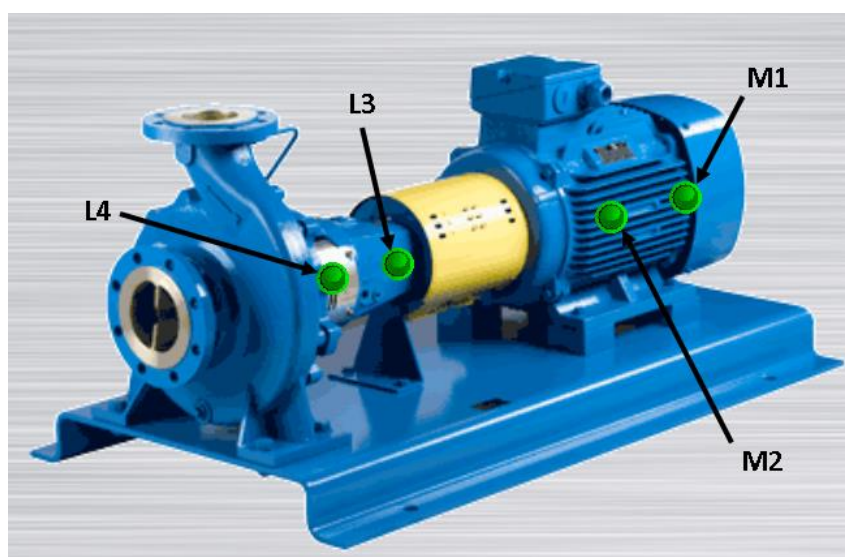


v tabulce 3.

Obr. 18) Schéma měřících bodů separátoru RS205 (Diflink) [25]

5.3.4 Čerpadla M334, M421 a M422

Čerpadla M421 a M422 dodávají papírovou hmotu na nátoky papírenského stroje. Čerpadlo M334 čerpá vodu odebranou z papírové hmoty v sítové části zpět do technologických okruhů. Na těchto čerpadlech jsou monitorovány vibrace na čtyřech měřících bodech uvedených a roztrženy v tabulce 3.



Obr. 19) Schéma měřících bodů čerpadel M334, M421 a M422 [25]

Tab 3) Měřicí body přípravný látky a konstantní části

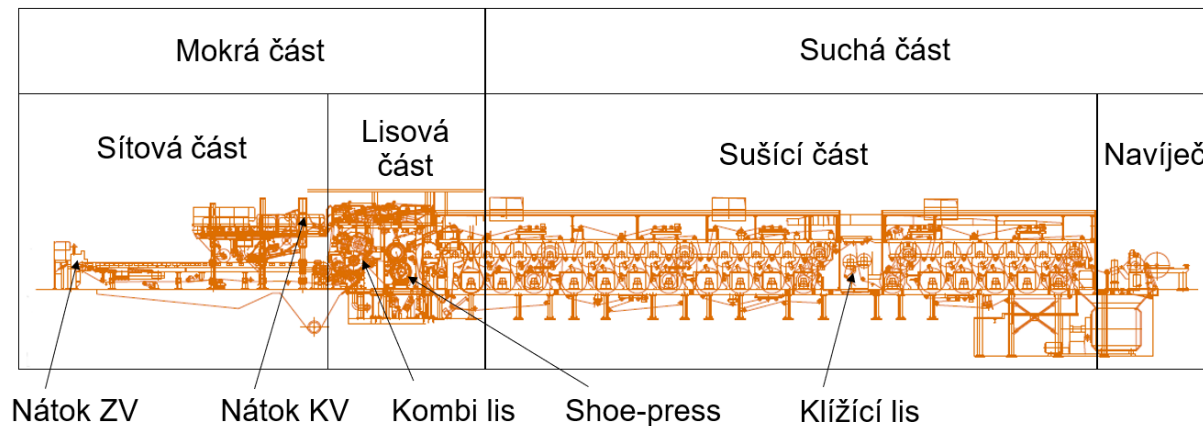
Zařízení	Zkratka	Měřicí body							Zakresleno v DP
		M1 KON	M2 SPOJ	G3 VST	G4 HOR	G5 DOL	P6 SPOJ	P7 HOR	
Rozvlakňovač Voith	Voith	P8 PLAST	M1 KON T	M2 SPOJ T	G3 VST T	G4 HOR T	P6 SPOJ T	P7 HOR T	Ano
									Ano
Třidiče	CH5	CH5 M1	CH5 M2	CH5 L3	CH5 L4	-	-	-	Ano
	CH7	CH7 M1	CH7 M2	CH7 L3	CH7 L4	-	-	-	Ano
	RS205	RS M1	RS M2	RS L3L	RS L3P	RS L4L	RS L4P	-	Ano
Čerpadla PS	M334	M334 M1	M334 M2	M334 L3	M334 L4	-	-	-	Ano
	M421	M421 M1	M421 M2	M421 L3	M421 L4	-	-	-	Ano
	M422	M422 M1	M422 M2	M423 L3	M422 L4	-	-	-	Ano
Ostatní čerpadla	M207	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M817	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M723	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M835	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M814	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M816	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M818	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M815	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M830	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M820	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M811	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M812	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M829	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M725	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M712	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M29	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M543	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M22	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M821	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M822	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M501	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M502	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
	M509	L1	L2	L3	L4	-	-	-	Ne
Třidiče	VOITH	L1	L2H	L2V	L2A	L3H	L3A	L3V	Ne
		L4dol	L5hor	L6dol	L7hor	L8	L9	L10	Ne
	F1 M208	L1H	L2H	L2A	L3H	L3V	L4H	L4V	Ne
		L4A	-	-	-	-	-	-	Ne
	OLV M206	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L3V	L4H	Ne
		L4V	L4A	L5H	L5A	L6H	L6A		Ne
	CH5 M702	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L4H	L4V	Ne
		L4A	-	-	-	-	-	-	Ne
	CH7 M703	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L4H	L4V	Ne
		L4A	-	-	-	-	-	-	Ne
	RS3B M705	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L5H	L5V	Ne
		L5A	L4H	L6H	L6V	L6A	-	-	Ne
	VAL M720	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L4H	L4V	Ne
		L4A	L5H	L5A	L6H	L6A	-	-	Ne
Míchadla	RM M710	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L4H	L4V	Ne
		L4A	-	-	-	-	-	-	Ne
	M722	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L3A	L4H	Ne
	M716	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L3A	L4H	Ne
	M717	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	L3A	L4H	Ne

Legenda:

DDS online
Pochůzka DIF
Pochůzka SKMP
DIFLINK online
SO - strana obsluhy
SP - strana pohonu
H - horizontál
V - vertikál
A - axial
T - měření teploty

5.4 Vlastní papírenský stroj

Vlastní papírenský stroj (obr. 20), dále jen PS, se dělí na dvě základní části, a to na část mokrou a suchou. Mokrá část se dále rozděluje na síťovou a lisovou část. Suchá část zahrnuje sušící část, klížící lis a navíječ. Jednotlivé části budou podrobně popsány níže i se všemi měřícími body, které obsahují. [6]



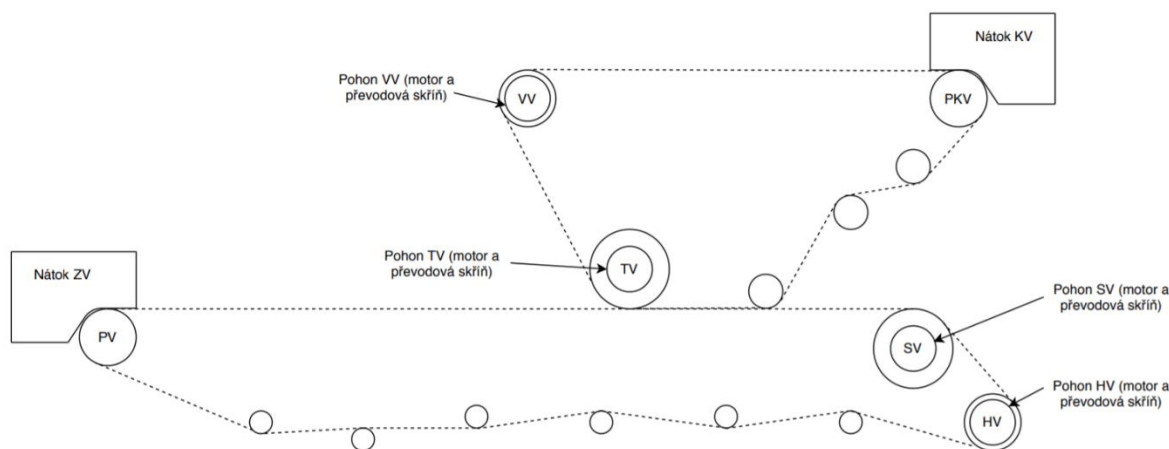
Obr. 20) Schéma vlastního papírenského stroje

5.4.1 Mokrá část

Mokrá část papírenského stroje se skládá z části síťové a lisové. Jedná se o první úsek vlastního papírenského stroje po proudu papíroviny. Papírová hmota se dostává na síťovou část nátoky. [9]

Síťová část se skládá ze dvou sekcí (obr. 21). sekce pro základní vrstvu, která obsahuje 65-75% vlákniny a ze sekce pro vrstvu krycí. Obě tyto sekce jsou vybaveny takzvanými nekonečnými odvodňovacími sítě. Ty slouží k odvodnění papíroviny. V první fázi každé sekce se využívá gravitačního odvodnění, následuje oblast nízkého a posléze oblast vysokého vakua, které separuje vodu od papírenských vláken. Krycí i základní vrstva papíru se u tvářecího válce spojí a na sebe nalepené vrstvy dále pokračují do lisové části.

Obě sekce se skládají ze tří hlavních válců, které jsou popsány na (obr. 21), z nátoky a několika vodících válečků. Na všech šesti hlavních válcích je monitorována teplota ložisek a velikost vibrací. Všechny měřící body síťové části jsou popsány v tabulce 4.



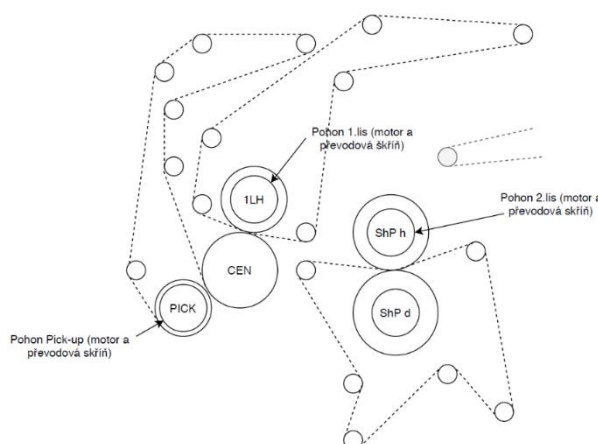
Obr. 21) Schéma síťové části

Lisová část (obr. 22) se skládá z combi lisu a nového typu lisu Shoe-press.

Combi lis je vybaven snímacím válcem pick-up, který pomocí vakua automaticky sbírá již vytvořený a částečně odvodněný papír ze sítové části. Combi lis samotný je tvořen třemi válci a takzvaným nekonečným plstěncem, který do sebe při lisování odebírá vodu z papírové hmoty. Dále papírovina postupuje do lisu Shoe-press.

Shoe-press je nová koncepce lisových částí, která zajišťuje vysoké lineární tlaky, čímž docílí efektivnějšího mechanického odvodnění papíroviny. V závodě Smurfit Kappa Morava Paper dosahuje sušina za tímto lisem hodnoty větší než 55 %.

Na všech pěti hlavních válcích popsanych na obrázku 22 jsou monitorovány teploty ložisek a velikosti vibrací.



Obr. 22) Lisová část (vlevo combi lis a vpravo shoe-press)

Všechny měřicí body mokré části jsou zobrazeny v tabulce 4. Tato tabulka slouží i jako vysvětlivka zkratk na obrázcích (obr. 3 a obr 4).

Tab 4) Tabulka měřících bodů mokré části

Část	Zkratka	Zařízení	Měřicí body								Zakresleno v DP
Sítová část	VV	Vratný válec	HS VV SO	HS VV SP	-	-	-	-	HS VV SO T	HS VV SP T	Ano
	TV	Tvářecí válec	HS TV SO	HS TV SP	-	-	-	-	HS TV SO T	HS TV SP T	Ano
	PKV	Prsní válec krycí vrstvy	HS PKV SO	HS PKV SP	-	-	-	-	HS PKV SO T	HS PKV SP T	Ano
	PV	Prsní válec	DS PV SO	DS PV SP	-	-	-	-	DS PV SO T	DS PV SP T	Ano
	SV	Sací válec	DS SV SO	DS SV SP	-	-	-	-	DS SV SO T	DS SV SP T	Ano
	HV	Hnací válec	DS HV SO	DS HV SP	-	-	-	-	DS HV SO T	DS HV SP T	Ano
	Pohon VV	Pohon vratného válce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon TV	Pohon tvářecího válce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon SV	Pohon sacího válce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
Pohon HV	Pohon hnacího válce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano	
Lisová část	PICK	Válec Pick-up	PICK SO	PICK VNITR SP	PICK SP	-	-	PICK SO T	PICK VNITR SP T	PICK SP T	Ano
	CEN	Centrální válec	CEN SO	CEN SP	-	-	-	-	CEN SO T	CEN SP T	Ano
	1LH	První lis horní	1LH SP	1LH SP	-	-	-	-	1LH SP T	1LH SP T	Ano
	ShP h	Shoe-press horní válec	ShP h SO	ShP d SP	-	-	-	-	ShP h SO T	ShP d SP T	Ano
	ShP d	Shoe-press dolní válec	ShP d SO	ShP d SP	-	-	-	-	ShP d SO T	ShP d SP T	Ano
	Pohon Pick-up	Pohon Pick-up	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon 1. lis	Pohon prvního lisu	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon 2. lis	Pohon horního válce Shoe-pressu	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano

Legenda:

DDS online	Pochůzka DIF	Pochůzka SKMP	DIFLINK online
------------	--------------	---------------	----------------

SO - strana obsluhy

SP - strana pohonu

H - horizontál

V - vertikál

A - axial

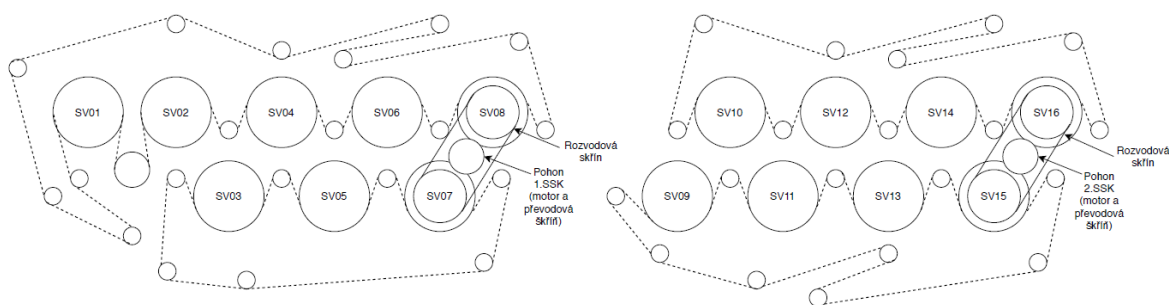
T - měření teploty

5.4.2 Suchá část

Suchá část papírenského stroje se skládá ze sušící části, klížícího lisu a navíječe.

Sušící část je nejdelší částí papírenského stroje. Hlavním úkolem sušící části je zajistit potřebnou sušící kapacitu pro dosažení stanoveného výkonu. Základní koncepcí je dvouřadé uspořádání sušících válců s průměrem 1500 mm, rozdělených do pěti sušících sekcí. První tři sekce tvoří samotnou sušící část. Mezi třetí a čtvrtou sekcí je umístěný klížící lis a čtvrtá a pátá sekce tvoří dosoušecí část. Sušící část obsahuje celkově 36 sušících válců, z nichž každý má vlastní přívod páry přes parní hlavu a zároveň odvod kondenzátu. Každou sekci pohání jeden motor, který je přes rozvodovou skříň napojen na dva válce. Ostatní válce v dané sekci jsou taženy takzvaným nekonečným sušícím sítím.

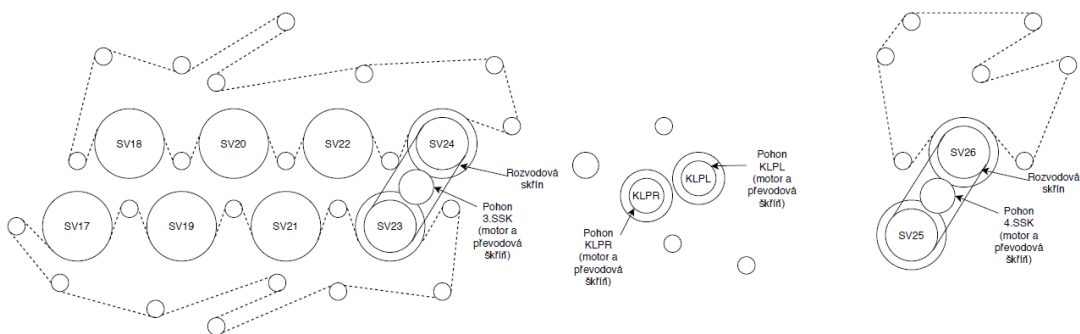
Obrázek 23 zobrazuje první a druhou sušící sekci. Každá z těchto sekcí se skládá z osmi hlavních sušících válců, ze dvou nekonečných sušících sít, pohonu a několika vodicích válečků. V těchto sekcích jsou sledovány vibrace na všech sušících válcích a na pohonech.



Obr. 23) Schéma 1. a 2. sušící sekce

Obrázek 24 zobrazuje třetí sušící sekci, klížící lis a čtvrtou sušící sekci. Třetí sušící sekce se skládá z 8 sušících válců dvou nekonečných sušících sít a několika vodicích válečků.

Klížící lis slouží k zušlechtění již suchého papíru. Může se jednat o povrchové klížení, natírání nebo barvení. Skládá ze dvou válců s nepatrným šikmým uspořádáním (obr). Oba válce mají stejné průměry, kvalita potahů je ale rozdílná, a to v jakosti i v tvrdosti potahu. Vibrace se zde sledují na obou lisech a na jednom z vodicích válečků, který se nachází přímo nad těmito lisy. Sledování vibrací na tomto válečku bylo zavedeno proto, že v případě upadnutí válečku mezi klížící lisy by došlo k fatální škodě na těchto lisech, které tvoří nezbytnou komponentu pro chod celého stroje. Pátá sušící část, někdy nazývána jako první dosoušecí část se skládá ze dvou sušících válců, jednoho nekonečného sušícího síta a z pohonu. V této sekci jsou sledovány vibrace pouze dvou hlavních sušících válců a pohonu.



Obr. 24) Schéma 3. sušící sekce, klížícího lisu a 4. sušící sekce

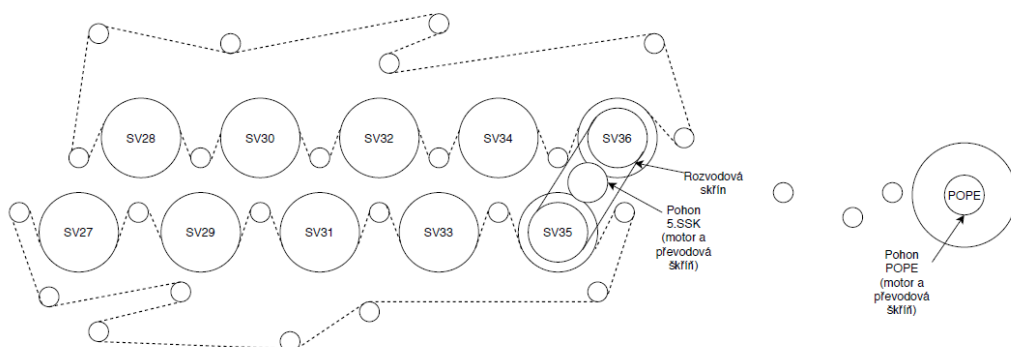
Pátá sušící sekce, někdy zvaná jako druhá dosoušecí sekce se skládá z deseti sušících válců, dvou nekonečných sušících sít, pohonu a několika vodicích válečků. V této sekci jsou monitorovány všechny sušící válce a pohon.

Všechny měřící body suché části jsou zobrazeny v tabulce 5.

5.4.3 Navíječ

Navíječ je poslední částí papírenského stroje. Slouží k navíjení pásu již hotového papíru do libovolného průměru role, takzvaného tamboru. Skládá se z, vodou chlazeného, nosného válce, který je poháněný motorem, a soustavou hydraulicky ovládaných ramen.

Na navíječi se sleduje stav vibrací na hlavním válci a na pohonu. Měřící body jsou zobrazeny v tabulce 5.



Obr. 25) Schéma 5. sušící sekce a POPE navíječe

Všechny měřící body suché části jsou zobrazeny v tabulce 5. Tato tabulka slouží i jako vysvětlivka zkratk na obrázcích (obr 23, 24, 25).

Tab 5) Tabulka měřících bodů suché části

Část	Zkratka	Zařízení	Měřící body								Zakresleno v DP
Sušící sekce	SV01-SV04	Sušící válec 01-04	SV01 SO	SV02 SO	SV03 SO	SV04 SO	SV01 SP	SV02 SP	SV03 SP	SV04 SP	Ano
	SV05-SV08	Sušící válec 05-08	SV05 SO	SV06 SO	SV07 SO	SV08 SO	SV05 SP	SV06 SP	SV07 SP	SV08 SP	Ano
	SV09-SV12	Sušící válec 09-12	SV09 SO	SV10 SO	SV11 SO	SV12 SO	SV09 SP	SV10 SP	SV11 SP	SV12 SP	Ano
	SV13-SV16	Sušící válec 13-16	SV13 SO	SV14 SO	SV15 SO	SV16 SO	SV13 SP	SV14 SP	SV15 SP	SV16 SP	Ano
	SV17-SV20	Sušící válec 17-20	SV17 SO	SV18 SO	SV19 SO	SV20 SO	SV17 SP	SV18 SP	SV19 SP	SV20 SP	Ano
	SV21-SV24	Sušící válec 21-24	SV21 SO	SV22 SO	SV23 SO	SV24 SO	SV21 SP	SV22 SP	SV23 SP	SV24 SP	Ano
	SV25-SV28	Sušící válec 25-28	SV25 SO	SV26 SO	SV27 SO	SV28 SO	SV25 SP	SV26 SP	SV27 SP	SV28 SP	Ano
	SV29-SV32	Sušící válec 29-32	SV29 SO	SV30 SO	SV31 SO	SV32 SO	SV29 SP	SV30 SP	SV31 SP	SV32 SP	Ano
	SV33-SV36	Sušící válec 33-36	SV33 SO	SV34 SO	SV35 SO	SV36 SO	SV33 SP	SV34 SP	SV35 SP	SV36 SP	Ano
	Pohon 1.SSK	Pohon 1. sušící sekce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
Klížící lis	Pohon 2.SSK	Pohon 2. sušící sekce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon 3.SSK	Pohon 3. sušící sekce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon 4.SSK	Pohon 4. sušící sekce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon 5.SSK	Pohon 5. sušící sekce	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	Pohon KL PR	Pohon přítláčeného válce klížícího lisu	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
POPE navíječ	Pohon KL PL	Pohon pevného válce klížícího lisu	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano
	KL PR	Klížící lis přítláčený válec	KL PR SO	KL PR SP	-	-	-	-	-	-	Ano
	KL PV	Klížící lis pevný válec	KL PV SO	KL PV SP	-	-	-	-	-	-	Ano
	KL PV	Vodicí váleček nad klížícím lisem	KL VV SO	KL VV SP	-	-	-	-	-	-	Ano
POPE navíječ	POPE	POPE navíječ	POPE SO	POPE SP	-	-	-	-	-	-	Ano
	Pohon POPE	Pohon POPE navíječe	1H	2H	2V	2A	3V	3A	4H	4A	Ano

Legenda:

DDS online Pochůzka DIF Pochůzka SKMP DIFLINK online
SO - strana obsluhy SP - strana pohonu H - horizontál V - vertikál A - axial T - měření teploty

Tab 6) Ostatní měřicí body papírenského stroje

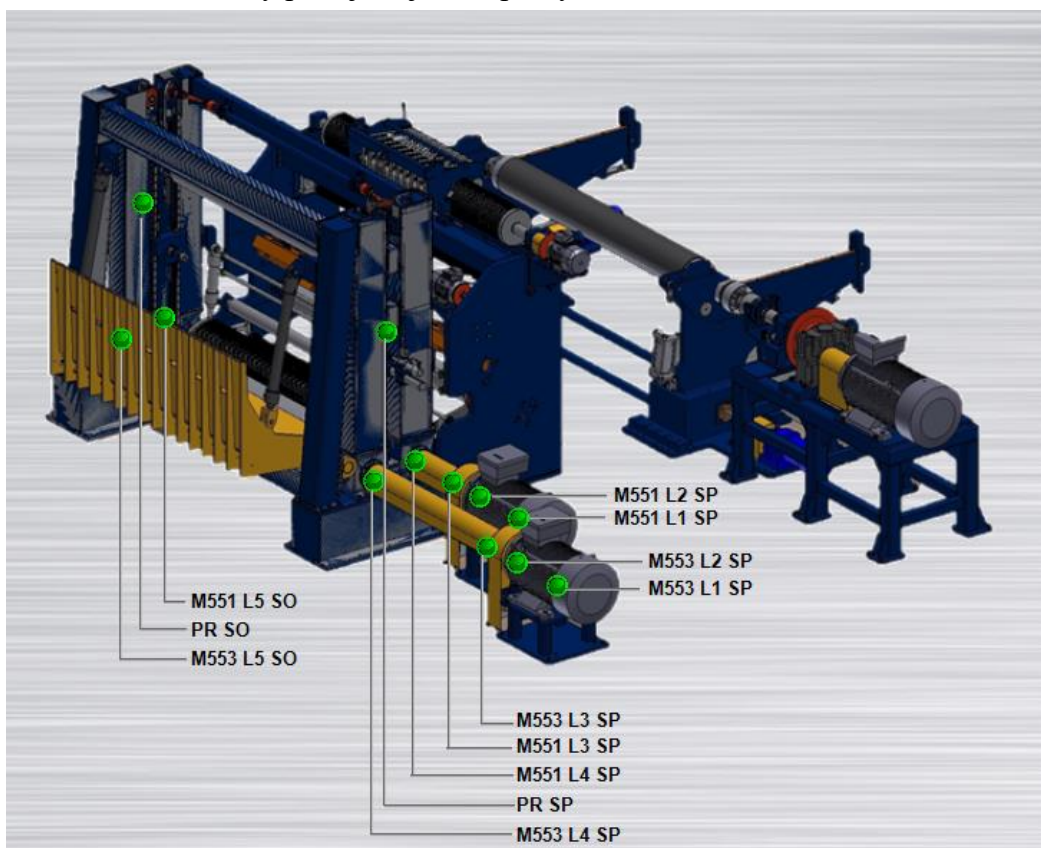
Papírenský stroj a jeho výzbroj							
Typ zařízení	Zkratka	Měřicí body					Zakresleno v DP
Čerpadla	M421	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M407	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M408	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M414	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M334	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M422	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M324	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M333	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M325	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M338	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M335	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M322	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M323	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M409	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M415	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M403	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M404	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M724	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M332	L1	L2	L3	L4	-	NE
Ventilátory	M463	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M464	L1	L2	L3	L4	-	NE
	M458	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
	M461	L1H	L2H	L3A	L4H	L4V	NE
		L4A	-	-	-	-	NE
	M315	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
	M436	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
	M462	L1	L2	L3H	L3V	L3A	NE
		L4H	L4V	L4A	-	-	NE
	M558	L1	L2H	L FAN H	L FAN V	LFAN A	NE
	M396	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
Vývěvy	M397	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
	M398	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
	M318 I.	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M320 II.	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M319 III.	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M317 IV.	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M316 V.	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
		L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
Uzelníky	M412	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
		L4H	-	-	-	-	NE
	M413	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M417	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M410	L1H	L2H	L2A	L3H	L4H	NE
	M726	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
Míchadla PS	M406 ZV	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
		L3A	L4H	-	-	-	NE
	M405 KV	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
		L3A	L4H	-	-	-	NE
	M336	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
		L3A	L4H	L4A	L5H	L5V	NE
		L5A	-	-	-	-	NE
	M331	L1H	L2H	L2V	L2A	L3H	NE
		L3A	L4H	L4A	-	-	NE

Legenda:

DDS online
Pochůzka DIF
Pochůzka SKMP
DIFLINK online
SO - strana obsluhy
SP - strana pohonu
H - horizontal
V - vertikál
A - axial
T - měření teploty

5.5 Převíječ

Převíječ slouží k finálnímu seřezání papíru na požadovanou velikost a navinutí určeného množství papíru z tamboru na papírovou trubici. Takto navinutý papír se již dováží k zákazníkovi. Měřicí body převíječe jsou zapsány v tabulce 7.



Obr. 26) Vlevo schéma převíječe s měřicími body vibrací, vpravo s měřicími body teplot [25]

Tab 7) Měřicí body převíječe

Převíječka			
Zařízení	Měřicí body		Zakresleno v DP
Motory	M551 L1 SP	M551 L1 SP T	ANO
	M551 L2 SP	M551 L2 SP T	ANO
	M553 L1 SP	M553 L1 SP T	ANO
	M553 L2 SP	M553 L2 SP T	ANO
Válce	M551 L3 SP	M551 L3 SP T	ANO
	M551 L4 SP	M551 L4 SP T	ANO
	M551 L5 SO	M551 L5 SO T	ANO
	PR SP	PR SP T	ANO
	M553 L3 SP	M553 L3 SP T	ANO
	M553 L4 SP	M553 L4 SP T	ANO
	M553 L5 SO	M553 L5 SO T	ANO
	PR SO	PR SO T	ANO

Legenda:

DDS online	Pochůzka DIF	Pochůzka SKMP	DIFLINK online
SO - strana obsluhy	SP - strana pohonu	H - horizontal	V - vertikál

A - axial

T - měření teploty

V tabulce 8 jsou ostatní měřicí body nacházející se v papírně.

Tab 8) Ostatní měřicí body v papírně

KANT						
Zkratka	Měřicí body					Zakresleno v DP
M551 - válec	L1 mot	L3 mot	L3	L4 SO	L5 SO	NE
M553 - válec	L1 mot	L3 mot	L3	L4 SO	L5 SO	NE
Přítlačný ventil	L1 SP	L2 SO	-	-	-	NE
1.válec	L1 mot	L2 mot	L3 SP	L4 SO	-	NE
2.válec	L1SP	L2SO	-	-	-	NE
3.válec	L1SP	L2SO	-	-	-	NE
Kotelna						
Typ zařízení	Zkratka	Měřicí body				Zakresleno v DP
Čerpadla	M8.1	L1	L2	L3	L4	NE
	M8.2	L1	L2	L3	L4	NE
	M7.1	L1	L2	L3	L4	NE
	M7.2	L1	L2	L3	L4	NE
	M7.3	L1	L2	L3	L4	NE

Legenda:

DDS online	Pochůzka DIF	Pochůzka SKMP	DIFLINK online		
SO - strana obsluhy	SP - strana pohonu	H - horizontál	V - vertikál	A - axial	T - měření teploty

6 METODY PRO MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VIBRACÍ PAPIRENSKÉHO STROJE

V této kapitole je popsán návrh metod pro hodnocení naměřených vibrací papírenského stroje. Obecně platí, že měření pomaloběžných strojů, jakým je i měřený papírenský stroj, je velmi obtížné. Takové měření vyžaduje dobře sladěný technický proces a moderní technologie elektronického zpracování pro určení signálů s velmi malou úrovní. Konkrétně u papírenských strojů je detekce signálu zvláště obtížná. Nelze klasicky monitorovat hladinu vibrací, protože v porovnání s velikostí zařízení mají valivé elementy malou hmotnost. Pohyb ložiskového domku způsobený vyprodukovanou rychlostí stroje je velmi malý a snímač vibrací již tuto hodnotu nemusí zachytit. Valivé elementy nedosahují dostatečné vzdálenosti pro vyvinutí rychlosti ani potřebnou hmotnost pro přenos energetického pulzu, který by byl kontinuálně měřitelný data kolektorem. K získání informací o stavu měřeného ložiska je možné použít algoritmy firmy SKF Condition Monitorin doporučujících využití metodu obálky zrychlení. Díky obálkové metodě zrychlení lze určit raná poškození takového rozměru, která jiným známým způsobem zatím nemohou být detekována. [7]

Pro úplnost měření je doporučeno doplnit obálkovou metodu zrychlení vibrací o podpůrná měření spekter, trendů a časového záznamu. Všechny doporučené metody budou dále základem pro vytvoření měřicí databáze, a proto jsou u nich popsány i měřicí parametry (tabulka 9).

Tab 9) Doporučené metody pro měření a vyhodnocení vibrací papírenského stroje

Zkratka	Název metody	Výstup měření	Typ hodnoty: zkratka	Typ hodnoty: název	Měřená veličina	Fmin	Fmax	Rozsah	Počet žar	Typ okna	Typ průměrování	Průměry	Přes sebe	Odhadovaná doba měření	Demod Fmin	Demod Fmax
VEL	Frekvenční analýza efektivní hodnoty rychlosti vibrací	Spektrum rychlosti vibrací	RMS	Efektivní hodnota	Rychlost [mm/s]	1 [Hz]	200	200 [Hz]	3200	Hanning	Lineární	4	75%	28 s	-	-
ACC	Frekvenční analýza hodnoty špička-špička zrychlení vibrací	Spektrum zrychlení vibrací	P-P	Špička-špička	Zrychlení [g]	0	6400	6400 [Hz]	25600	Hanning	Lineární	5	50%	8 s	-	-
EN3	Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací	Spektrum obálky zrychlení filtrem 3	P-P	Špička-špička	Zrychlení [g]	-	-	200 [Hz]	3200	-	Lineární	Vypnuto	-	16 s	500 [Hz]	10000 [Hz]
EN2	Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací	Spektrum obálky zrychlení filtrem 2	P-P	Špička-špička	Zrychlení [g]	-	-	200 [Hz]	3200	-	Lineární	Vypnuto	-	16 s	50 [Hz]	1000 [Hz]
VEL OVR RMS	Trend celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací	Trend efektivní hodnoty rychlosti vibrací	OVR RMS	Celková efektivní hodnota	Rychlost [mm/s]	1 [Hz]	200 [Hz]	-	-	-	Lineární	4	-	1 s	-	-
ACC OVR 0-P	Trend celkové hodnoty špičky zrychlení vibrací	Trend hodnoty špičky zrychlení vibrací	OVR 0-P	Celková hodnota špičky	Zrychlení [g]	0	6400 [Hz]	-	-	-	Lineární	4	-	1 s	-	-
EN2 OVE P-P	Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací	Trend hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací	OVR P-P	Celková hodnota špička-špička	Zrychlení [g]	-	-	-	-	-	Lineární	Vypnuto	-	1 s	50 [Hz]	1000 [Hz]
EN3 OVR P-P	Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací	Trend hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací	OVR P-P	Celková hodnota špička-špička	Zrychlení [g]	-	-	-	-	-	Lineární	Vypnuto	-	1 s	500 [Hz]	10000 [Hz]
ACC TIME	Časový záznam rychlosti vibrací	Časový záznam rychlosti vibrací	-	-	Zrychlení [g]	0	6400 [Hz]	-	-	-	-	-	-	3 s	-	-

6.1 Obálková metoda

Obálková metoda umožňuje odvodit periodické rázy z vibračního signálu měřeného zařízení. Díky této metodě lze rozeznat i rázy s velmi malou energií a rázy skryté za jiným vibračním signálem. Tato metoda se využívá pro analýzu poškození ložisek. Její princip spočívá ve vyfiltrování signálu z ložisek od ostatních signálů. Umožňuje rozpoznat poškození valivých elementů, vnějšího či vnitřního kroužku nebo klece ložiska. Jednotlivá poškození mají svou vlastní poruchovou frekvenci, která může být ve spektru odhalena. [11, 24]

Odvalováním poškozeného prvku ložiska vznikají rázy vyvolávající zvýšené vibrace na frekvenci daného rázu. Signál je veden do filtru propouštějícího jen vysoké frekvence, který odstraní většinu šumu. Po usměrnění se signál změní v takzvanou obálku neboli obalené pulsy. Celková energie se sníží, ale impulsy se opakují ve stejných intervalech, protože frekvence opakování signálu se po průchodu filtrem zachová. Spektrum takové obálky je získáno pomocí FFT analyzátoru. Takové spektrum obsahuje složku, jejíž frekvence udává kinematické frekvence ložiska. Pro výpočet kinematické neboli opakovací, frekvence impulsů za předpokladu čistě valivého pohybu jsou použity následující vztahy: [1, 54]

- **BPFO** (Ball Pass Frequency Outer Race) – závadová frekvence vnějšího kroužku ložiska:

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (16)$$

- **BPFI** (Ball Pass Frequency Inner Race) – závadová frekvence vnitřního kroužku ložiska:

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (17)$$

- **BSF** (Ball spin Frequency)- závadová frekvence kuličky (válečku) ložiska:

$$f = \frac{PD}{2BD} f_r \left(1 - \left(\frac{PD}{BD} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (18)$$

- **FTF** (Fundamental Train Frequency) – závadová frekvence klece ložiska:

$$f = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (19)$$

kde

BD -průměr kuličky (válečku)

PD -roztečný průměr

B -úhel dotyku

n -počet kuliček (válečků)

f_r -frekvence dána relativními otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku.

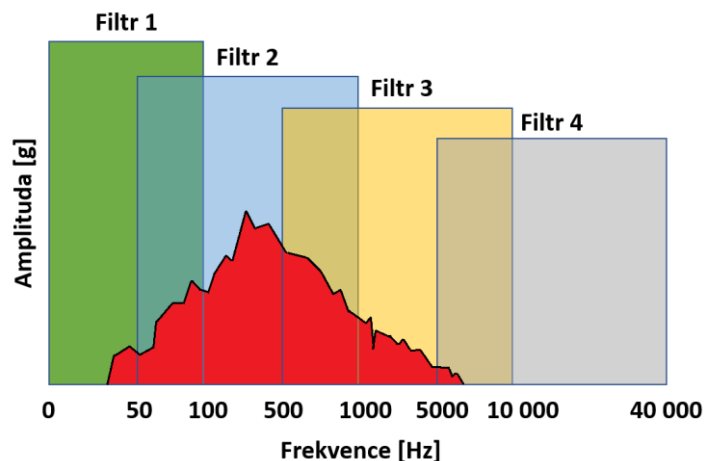
Firma Adash využívá k obálkové metodě 4 filtry, které umožňují zachycení harmonické energie v odpovídajícím rozsahu. Na obrázku 27 lze vidět, že největší energii zachytil filtr 2, pak filtr 3 a filtr 1. Do filtru 4 se dostalo energie jen velmi málo. Z toho vyplývá že pro diagnostiku tohoto konkrétního případu je nejvhodnější druhý filtr. U každého měření je důležité používat více filtrů a vybrat ten nejvhodnější, protože vhodný může být na různé případy různý filtr.

Poškození ložisek se většinou nejprve objevuje v obálce 4 a postupně přechází do obálky 1. Pokud je poškození detekovatelné i v obálce 1 jedná se o vážnou závadu a je třeba ložisko co nejdříve vyměnit, protože hrozí havárie stroje.

Pro tuto diplomovou práci byly pro obálkovou metodu zvoleny filtry 2 a 3.

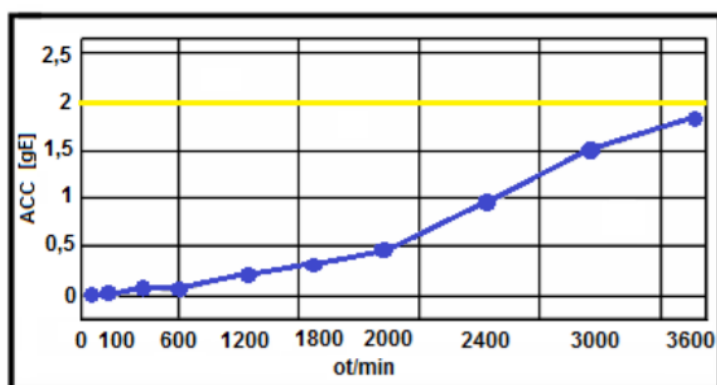
Parametry filtrů:

- Filtr 1 – frekvenční pásmo 5-100 Hz, doporučená rychlost stroje 0-50 RPM
- Filtr 2 – frekvenční pásmo 50-1000 Hz, doporučená rychlost stroje 25-500 RPM
- Filtr 3 – frekvenční pásmo 500-10 000 Hz, doporučená rychlost stroje 250-5 000 RPM
- Filtr 4 – frekvenční pásmo 5 000-40 000 Hz, doporučená rychlost stroje 2 500 a více RP



Obr. 27) Příklad možného rozložení energie u poškozeného ložiska [7]

Elementy valivých ložisek generují při nižších otáčkách mnohem menší energii než stejné elementy při vyšších otáčkách. Obrázek 28 zobrazuje pokus, který byl proveden v laboratorních podmínkách s poškozeným ložiskem stejnosměrného motoru. Výchozí otáčky motoru byly 50 RPM a postupně se zvyšovaly až na hodnotu 3 600 RPM. Při nejnižších otáčkách amplituda zrychlení dosahovala hodnoty 0,004 gE a při nejvyšších otáčkách 1,8 gE. To je navýšení amplitudy 450x. Je patrné, že stejné ložisko při nižších otáčkách musí mít alarmy nastaveny mnohem níže než při otáčkách vyšších.



Obr. 28) Závislost amplitudy zrychlení na otáčkách při stejné závadě na vnějším kroužku ložiska [7]

6.2 Trend celkové hodnoty

Jedná se o měření statické hodnoty, výsledek měření je reprezentován pouze jedním číslem. Neustálé opakování tohoto měření a zapisování celkových hodnot v čase umožňuje sledovat, zdali se hodnoty postupně zvyšují nebo ne. Stabilní trend vypovídá o stále stejném stavu stroje. V případě že celková hodnota trendu narůstá, dochází ke zhoršování stavu stroje. Trendy slouží hlavně jako upozornění na skutečnost, že se s měřeným zařízením něco děje. Při zvyšování

hodnot trendů je doporučeno měřit dané zařízení častěji a zaměřit se na detailnější analýzy spekter a spekter obálky. V případě tendování hodnot je důležité odlišit trendy rychlosti a zrychlen vibrací.

Navyšování trendu rychlosti vibrací vypovídá o mechanické závadě související s otáčkami stroje. Mezi případy takových závad se řadí nevyváženost, nesouosost nebo mechanické uvolnění.

Navyšování trendu zrychlení vibrací se většinou vztahuje k poruchám ložisek. V tomto případě je doporučeno ložisko domazat a opakovat měření s častějšími intervaly. Pokud hodnota stoupá i po promazání mělo by se ložisko preventivně vyměnit.

6.3 Frekvenční analýza

Frekvenční analýza patří mezi nejdůležitější nástroje pro nalezení periodických jevů nacházejících se ve vibračním signálu.

Výpočet frekvenční oblasti je obvykle založen na diskretní Fourierově transformaci. Frekvenční analýza rozkládá původní časový průběh na jednotlivé harmonické, to znamená sinusové a kosinusové, složky. Součtem těchto složek vznikne nazpět původní časový průběh. Ze spektra signálu jsou vybrány jen takové frekvenční složky, které nesou požadovanou diskriminativní informaci. [1]

Grafickým výstupem frekvenční analýzy je spektrum poskytující detailní informace o zdrojích signálu. Při vyhodnocování veličin v nízkých frekvencích je vhodné využít hodnotu špičky, nebo špička-špička. Pro vyhodnocování veličin na vysokých frekvencích se doporučuje využít efektivní hodnotu zrychlení.

Frekvenční analýza je založena na matematické teorii, která říká, že každou periodickou křivku lze zobrazit jako součet sinusových křivek.

Spektrální analýza popisuje rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti. Vyjadřuje analyzovaný signál pomocí ortogonálních bázeových funkcí. K tomu využívá Fourierovu transformaci, u které je bázeovou funkcí funkce $e^{j2\pi ft}$.

S pomocí Fourierovy transformace lze analyzovat především periodické a neperiodické signály. V případě náhodných signálů nelze Fourierovu transformaci použít. Reálné signály papírenských strojů jsou většinou periodické a neperiodické.

Pro výpočet kmitočtových složek je využita přímá Fourierova transformace, která je dána spojitým analytickým integrálem: [1]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (20)$$

Pro zpětnou Fourierovu transformaci (inverzní) platí: [1]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (21)$$

kde:

- $x(t)$ - spojitý signál
- f - frekvence
- j - imaginární jednotka.

6.4 Časový záznam

Průběžná ukládání naměřených dat ve formě časového záznamu umožňuje pozdější provádění analýz, které nebyly použity při samotném měření, opakované provádění analýz s možností filtrací signálu, práci s časovými průběhy měřených signálů, a především slouží jako **záloha měřených dat**.

6.5 Doporučené vyhodnocovací algoritmy

Pro všechny čtyři použité databáze byly doporučeny následující vyhodnocovací algoritmy.

6.5.1 Diflink a DDS online

K měření jsou využity metody popsané v tabulce 9.

1. Každé ráno zkontroluje diagnostiky SKMP aktuální hodnoty vibrací v softwarech Diflink a DDS.
2. V případě, že hodnoty některých měřících bodů překračují doporučené meze, nahlédne diagnostik do trendů.
 - a. Pokud došlo k jednorázovému rychlému vyskočení hodnot nad povolené meze a následnému poklesu, ověří diagnostik, co se v danou dobu dělo. Ze zkušeností lze předpokládat, že se jedná o extrémní situace nesouvisející s běžným provozem (odstávky, přetrhy, nájezdy).
 - i. Pokud se potvrdí extrémní situace, potvrdí kontrolu
 - ii. Pokud se nepotvrdí extrémní situace následuje krok 3
 - b. Pokud se jedná o trvalé překročení mezí následuje krok 3
3. Diagnostik vizuálně zkontroluje zařízení, na kterém se nachází body vykazující zvýšené vibrace a toto zařízení přeměří přístrojem VA4 Pro II. Toto měření nahraje do programu DDS do rubriky neperiodická měření a vyhodnotí.
4. V případě že diagnostikuje zhoršující stav zařízení, zkontroluje, zdali je zařízení správně mazáno, zdali nejsou špatně nastavené meze, nebo zdali zvyšující se vibrace nezpůsobují jiné skutečnosti.
5. Pokud nezjistí problém, který by byl schopný vyřešit sám, informuje o této skutečnosti neprodleně manažera údržby a expertní firmu Dif.
6. V případě nutnosti opravy nebo výměny problémové součásti, bude naplánovaná odstávka tak, aby nedošlo ke zbytečnému prostoji papírenského stroje.
7. O všech činnostech si pracovník vede záznamy, které prezentuje 3x týdně (pondělí, středa a pátek) na poradách údržby.

6.5.2 Pochůzkové měření SKMP

K měření jsou využity metody popsané v tabulce 9.

1. Diagnostik závodu SKMP změří 1x za měsíc všechny měřicí body obsažené v pochůzce SKMP a tyto body následně uloží do programu DDS ve kterém je vyhodnotí. Při měření provede diagnostik vizuální kontrolu všech zařízení.
2. V případě, že diagnostikuje zhoršující stav zařízení, zkontroluje, zdali je zařízení správně mazáno, zdali nejsou špatně nastavené meze, nebo zdali zvyšující se vibrace nezpůsobují jiné skutečnosti.
3. Pokud nezjistí problém, který by byl schopný vyřešit sám, informuje o této skutečnosti manažera údržby a expertní firmu Dif.
 - a. V případě že se problém pokusí řešit sám, provede po zásahu do zařízení opětovné měření, aby byla potvrzena nebo vyvrácena účinnost tohoto zásahu.
4. V případě nutnosti opravy nebo výměny problémové součásti, bude naplánován zásah tak, aby nedošlo ke zbytečnému prostoji papírenského stroje.
5. O všech činnostech si pracovník vede záznamy, které prezentuje 3x týdně (pondělí, středa a pátek) na poradách údržby.

6.5.3 Pochůzkové měření Dif

K měření jsou využity metody popsané v tabulce 9.

1. Diagnostik firmy Dif změří 1x za měsíc všechny měřicí body obsažené v pochůzce Dif a tyto body následně uloží do programu DDS ve kterém je vyhodnotí. Při měření provede diagnostik vizuální kontrolu všech zařízení. Toto měření provede vždy 3 týdny před plánovanou odstávkou papírenského stroje tak, aby v případě diagnostikování vznikající závady mohl být na odstávce proveden zásah.
2. V případě že diagnostikuje zhoršující stav zařízení, zkontroluje, zdali je zařízení správně mazáno, zdali nejsou špatně nastavené meze, nebo zdali zvyšující se vibrace nezpůsobují jiné skutečnosti. Danou situaci konzultuje s diagnostikem SKMP.
3. V případě nutnosti opravy nebo výměny problémové součásti, konzultuje tuto skutečnost diagnostik firmy dif s diagnostikem firmy SKMP a s manažerem údržby. Ten naplánuje zásah tak, aby nedošlo ke zbytečnému prostoji papírenského stroje.
4. Diagnostik firmy Dif 1x za měsíc provede vyhodnocení všech měřících bodů pochůzky dif, DDS online a Dif online. Provede zápis o všech vyhodnocovaných bodech, který zašle manažerovi údržby a diagnostikovi SKMP a to vždy nejpozději 14 před plánovaným odstavením stroje, aby bylo možné na plánované odstavení naplánovat zásah.

7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola pojednává o měření a vyhodnocení vibrační ložiska centrálního na straně pohonu, který se nachází v lisové části papírenského stroje (obr. 22). K vyhodnocení stavu ložiska byly využity metody popsány v kapitole 7 a všechny metody popsány v tabulce 10. Ostatní vyhodnocení testových měření jsou uvedena v příloze 2.

Na základě vyhodnocení tohoto ložiska byla v papírně naplánována odstávka na 11. 12. 2019, na které došlo k výměně centrálního válce. Po výměně válce byl stav tohoto ložiska dále monitorován. Díky tomu lze dobře porovnat stav před a po výměně.

7.1 Příprava k měření

Před samotným vyhodnocováním stavu je nutno vypočítat poruchové frekvence daného ložiska, které jsou závislé na rychlosti otáčení. Rychlost otáčení každého válce se mění v závislosti na výkonu papírenského stroje i několikrát denně. Proto byla v Microsoft Excelu vytvořena tabulka 10 s přednastavenými vzorci, která podle změřené rychlosti na navíječi papírenského stroje vypočítá rychlost měřeného válce a poruchové a otáčkové frekvence ložiska, které jsou popsány v kapitole 7.1 Obálková metoda.

Všechna měření před výměnou centrálního válce byla provedena 18. 11. 2019 mezi 10:00 a 11:00. Změřená rychlost na POPE navíječi byla 442 m/min. Porovnávací měření po výměně centrálního válce bylo provedeno 18. 12. 2019 mezi 8:00 a 9:00, kdy byla rychlost na POPE navíječi 448 m/min, tedy téměř shodná. Zanášení hodnot do trendů je prováděno pravidelně a automaticky a informace o rychlosti na POPE navíječi nejsou k dispozici.

Po dosazení rychlosti navíječe 442 m/min byly vypočteny následující frekvence:

- Otáčková frekvence	- 2,0 Hz
- BPFO	- 18,3 Hz
- BPFI	- 23,5 Hz
- BSF	- 7,7 Hz
- FTF	- 0,9 Hz

V této kapitole bude důležitá otáčková frekvence a poruchová frekvence vnitřního kroužku ložiska.

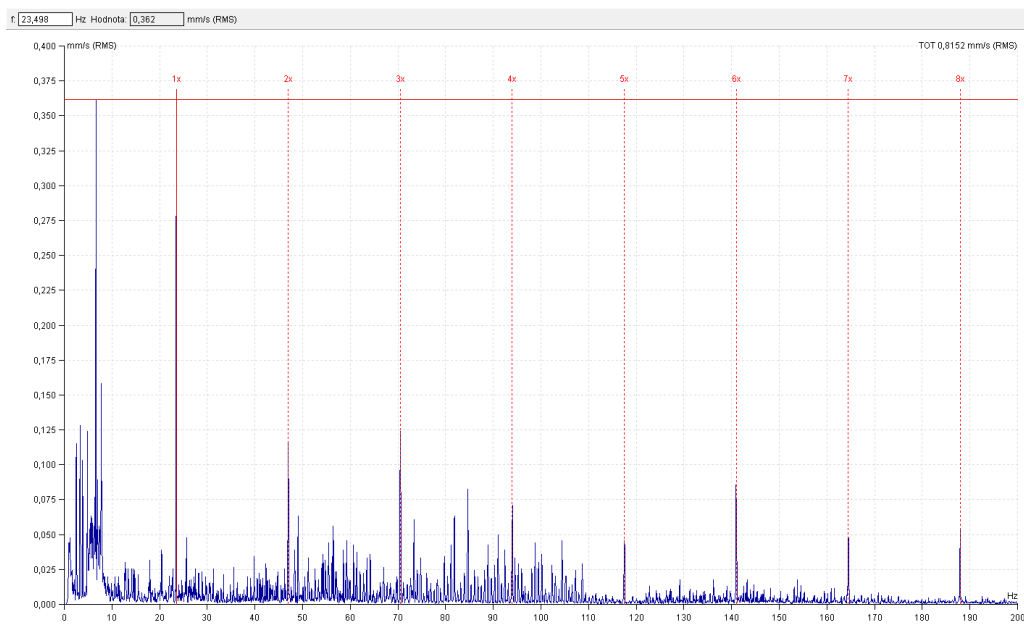
Tab 10) Tabulka pro výpočet otáčkových a ložiskových frekvencí

Očekávané frekvence PS2 KAPPA ŽIMROVICE - válce a ložiska																						
Rychlost v [m/min] na navíječi v [m/s]		442 366,00	Zadání						Ot.fr					Ložiskové frekvence SP								
Položka	1 a 2 lisová skupina	Popis	Poměr k navíječi	Rychlost [m/min]	Rychlost [m/sec]	Otáčky [rpm]	Průměr [mm]	Obvod [m]	Frekvence [Hz]					Frekvence při jmenovité rychlosti [Hz]					Jedn. frekvence v [Hz]			
									0,5x	1x	2x	3x	4x	Typ ložiska	FTF	BSF	BPFO	BPFI	FTF	BSF	BPFO	BPFI
9	1 lis horní	1LH	0,969415	428,5	7,1	157,7	865,0	2,7	1,3	2,6	5,3	7,9	10,5	231 52CCK/HA30	1,2	10,2	24,2	31,0	0,4	3,9	9,2	11,8
10	Centrální	CV	0,969415	428,5	7,1	119,3	1143,0	3,6	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	231 52CCK/HA30	0,9	7,7	18,3	23,5	0,4	3,9	9,2	11,8
11	PickUp	PIC	0,978015	432,3	7,2	183,5	750,0	2,4	1,5	3,1	6,1	9,2	12,2	23140CCK/W33	1,3	11,7	28,1	36,1	0,4	3,8	9,2	11,8
	PickUp	PIC	0,978015	432,3	7,2	183,5	750,0	2,4	1,5	3,1	6,1	9,2	12,2	23126CC/W33	1,4	12,9	29,8	37,5	0,4	4,2	9,7	12,3
12	2.lis horní	2LH	0,981895	434,0	7,2	190,5	725,0	2,3	1,6	3,2	6,4	9,5	12,7	232 40CCK/W33	1,4	11,3	26,1	34,2	0,4	3,6	8,2	10,8
	2.lis horní	2LH	0,981895	434,0	7,2	190,5	725,0	2,3	1,6	3,2	6,4	9,5	12,7	232 44CCK/W33	1,4	10,8	26,0	34,4	0,4	3,4	8,2	10,8
13	2.lis dolní	2LD	0,981895	434,0	7,2	191,9	720,0	2,3	1,6	3,2	6,4	9,6	12,8	232 40CCK/W33	1,4	11,4	26,3	34,5	0,4	3,6	8,2	10,8
	2.lis dolní	2LD	0,981895	434,0	7,2	191,9	720,0	2,3	1,6	3,2	6,4	9,6	12,8	232 44CCK/W33	1,4	10,9	26,1	34,6	0,4	3,4	8,2	10,8

7.2 Frekvenční analýza efektivní hodnoty rychlosti vibrací

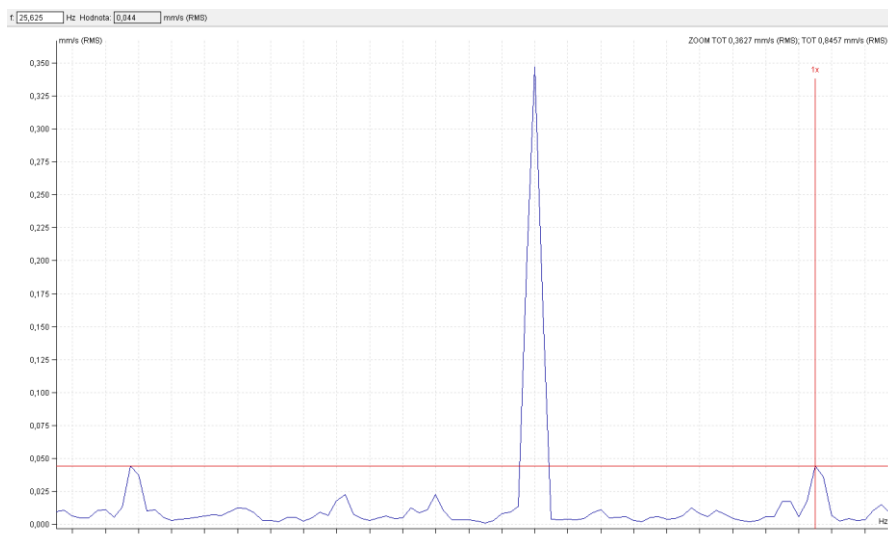
Na obrázku 29 je zobrazeno spektrum rychlosti vibrací ložiska centrálního válce na straně pohonu změřeno před výměnou centrálního válce. Ve spektru jsou přítomny harmonické násobky frekvence 23,498 Hz. Tato frekvence podle tabulky odpovídá poruchové frekvenci vnitřního kroužku ložiska.

Největší amplituda zde dosahuje hodnoty 0,36 mm/s. Špička nacházející se na první poruchové frekvenci dosahuje hodnoty 0,362 mm/s.



Obr. 29) Spektrum rychlosti vibrací CEN SP před výměnou

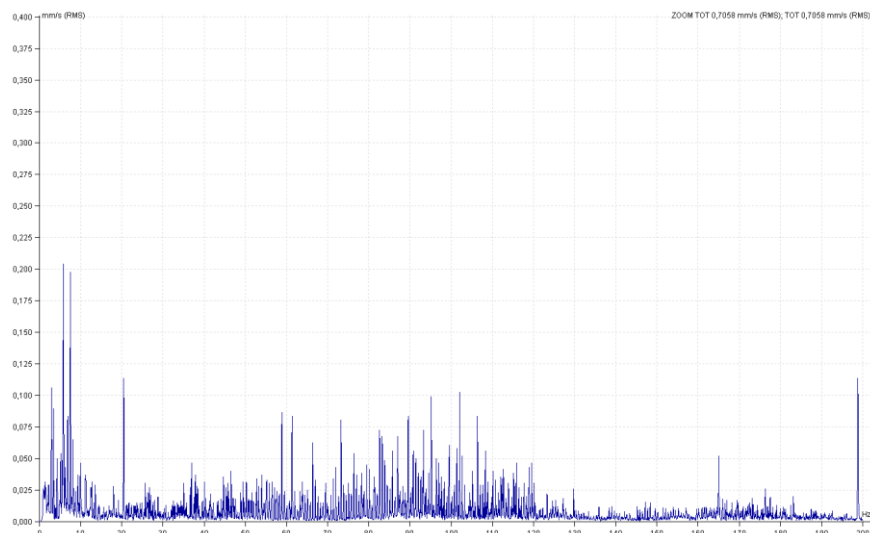
Při přiblížení spektra k jakékoliv špičce lze rozpoznat postranní pásma. Obrázek 30 zobrazuje přiblížení spektra k nejvyšší špičce. Postranní špička na frekvenci 25,625 Hz je od hlavní špičky vzdálena 2,127 Hz. Postranní pásma v okolí dalších špiček jsou od hlavní špičky vzdáleny o 1,7 až 2,4 Hz, což podle tabulky 10 přibližně odpovídá otáčkové frekvenci.



Obr. 30) Spektrum rychlosti vibrací CEN SP před výměnou přiblíženo na nejvyšší špičku

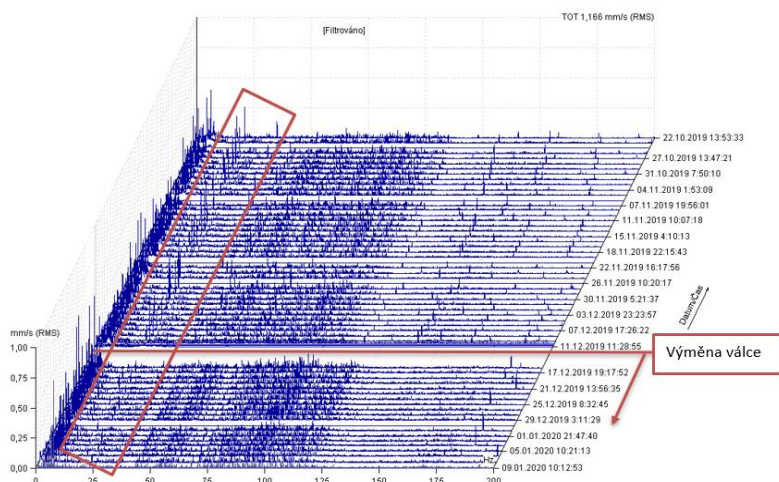
Na obrázku 31 lze vidět spektrum rychlosti vibrací ložiska centrálního válce na straně pohonu změřené po výměně válce. Ve spektru nejsou patrné žádné harmonické násobky frekvencí. Poruchové harmonické násobky frekvence 23,5 Hz úplně vymizely. Nejvyšší amplituda zde dosahuje výšky 0,21 mm/s

Spektrum bylo záměrně přiblíženo tak, aby hodnoty na osách x a y odpovídaly spektru před výměnou centrálního válce a aby byl na první pohled zřetelný rozdíl.



Obr. 31) Spektrum rychlosti vibrací CEN SP po výměně

Na obrázku 32 lze vidět kaskádu spekter rychlosti vibrací v čase. Na první pohled je patrné, že po výměně válce vymizely špičky na frekvencích mezi v okolí 25 Hz.

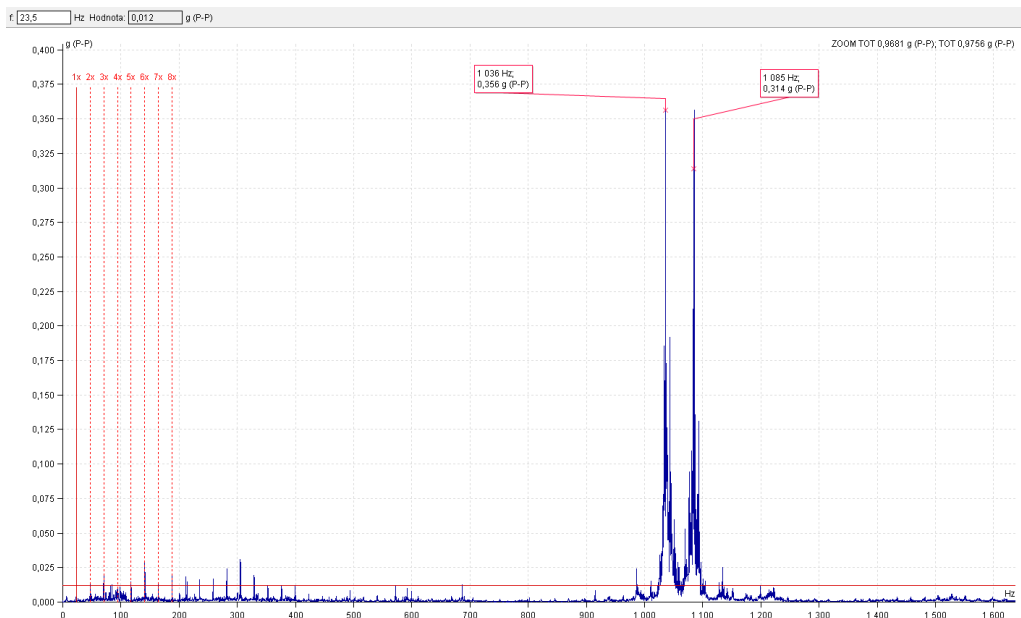


Obr. 32) Kaskáda spekter rychlosti vibrací CEN SP v čase

7.3 Frekvenční analýza hodnoty špička-špička zrychlení vibrací

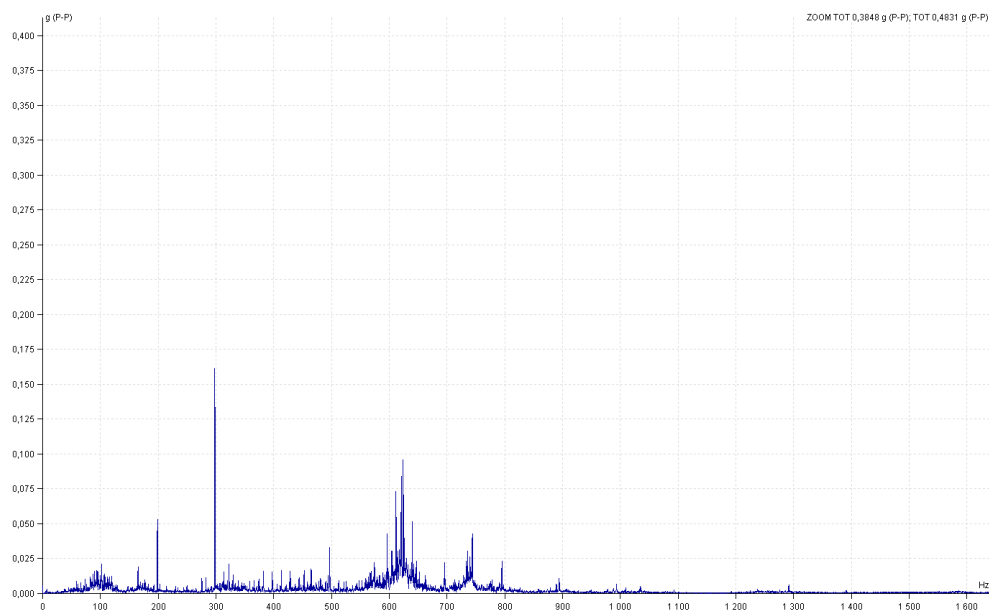
Na obrázku 33 lze vidět spektrum hodnot špička-špička zrychlení vibrací. V levé části spektra v rozmezí 0 až 200 Hz lze vidět malé špičky do velikosti 0,3 g. První špička se nachází na frekvenci 23,5 Hz a ostatní špičky na harmonických násobcích této frekvence. Jedná se o stejnou frekvenci, která byla zachycena už při frekvenční analýze rychlosti vibrací a která odpovídá poruše vnitřního kroužku ložiska.

V tomto případě jsou nositelem důležité informace dvě špičky, které se nacházejí na frekvenci mezi 1000 až 1100 Hz. Při přiblížení spektra k těmto špičkám je patrné, že jsou od sebe vzdáleny o 47 Hz, tedy o dvojnásobek poruchové frekvence 23,5 Hz, která se vyskytuje na začátku spektra a ve spektru rychlosti vibrací. Jejich amplituda dosahuje hodnoty 0,356 a 0,314 g. Důvod výskytu těchto špiček nebyl identifikován.



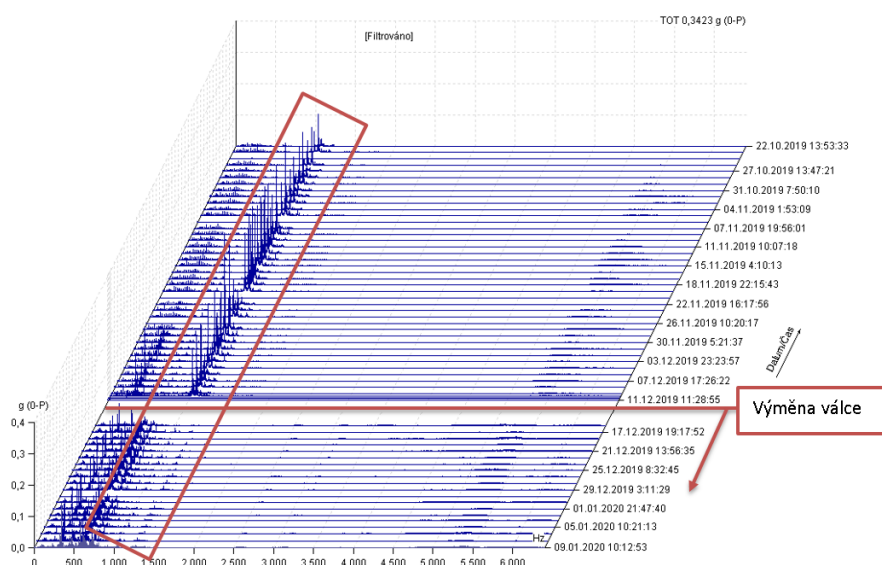
Obr. 33) Spektrum zrychlení vibrací CEN SP před výměnou

Obrázek 34 zobrazuje spektrum zrychlení vibrací změřené až po výměně centrálního válce. Ve spektru nejsou přítomny poruchové frekvence ložisek. Dvě vysoké špičky na frekvencích od 1000 do 1100 Hz vymizely. Amplitudy dosahují hodnot pod 0,16 g. Spektrum je záměrně přiblíženo stejným způsobem jako obrázek spektra před výměnou, aby byl na první pohled zřetelný rozdíl.



Obr. 34) Spektrum zrychlení vibrací CEN SP po výměně

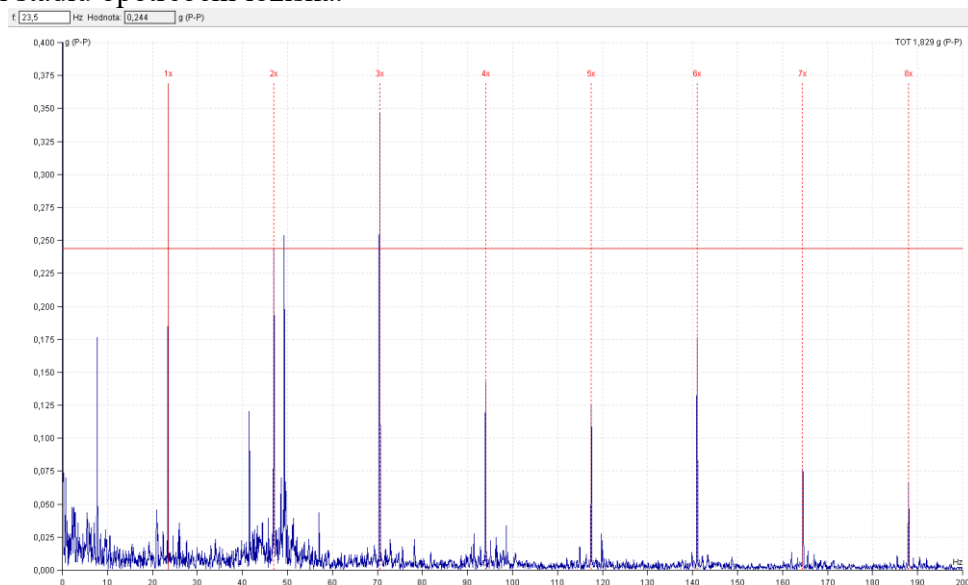
Na obrázku 35 lze vidět kaskádu spekter zrychlení vibrací na ložisku centrálního válce na straně pohonu v čase. Po výměně centrálního válce se ze spekter vytratily dvě špičky, které lze na obrázku 33 vidět mezi 1000 až 1100 Hz.



Obr. 35) Kaskáda spekter zrychlení vibrací CEN SP v čase

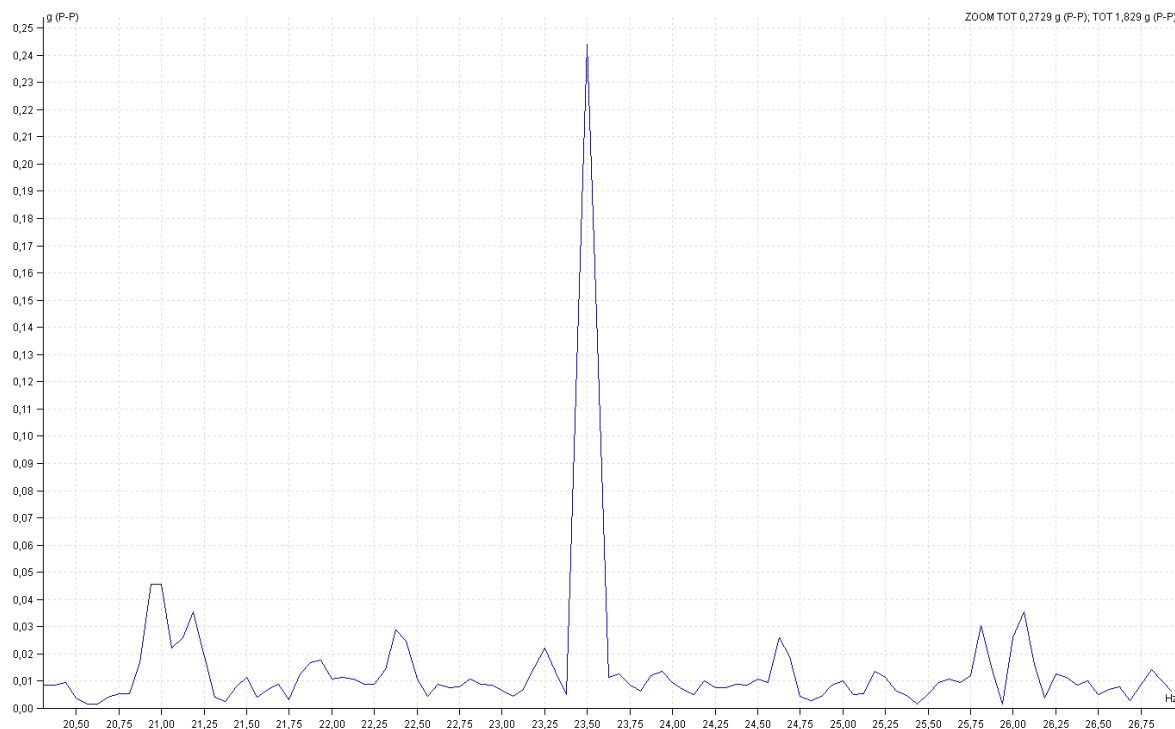
7.4 Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací filtrem 3

Na obrázku 36 je zobrazeno spektrum obálkové metody hodnoty špička-špička zrychlení vibrací získané filtrem tři. Ve spektrum změřeném před výměnou centrálního válce jsou patrné harmonické násobky frekvence 23,5 Hz, které odpovídají poškození vnitřního kroužku ložiska. Amplituda dosahuje velikosti 0,34 g. Poškození je patrné přes celé měřené pásmo, což vypovídá o pokročilém stádiu opotřebení ložiska.



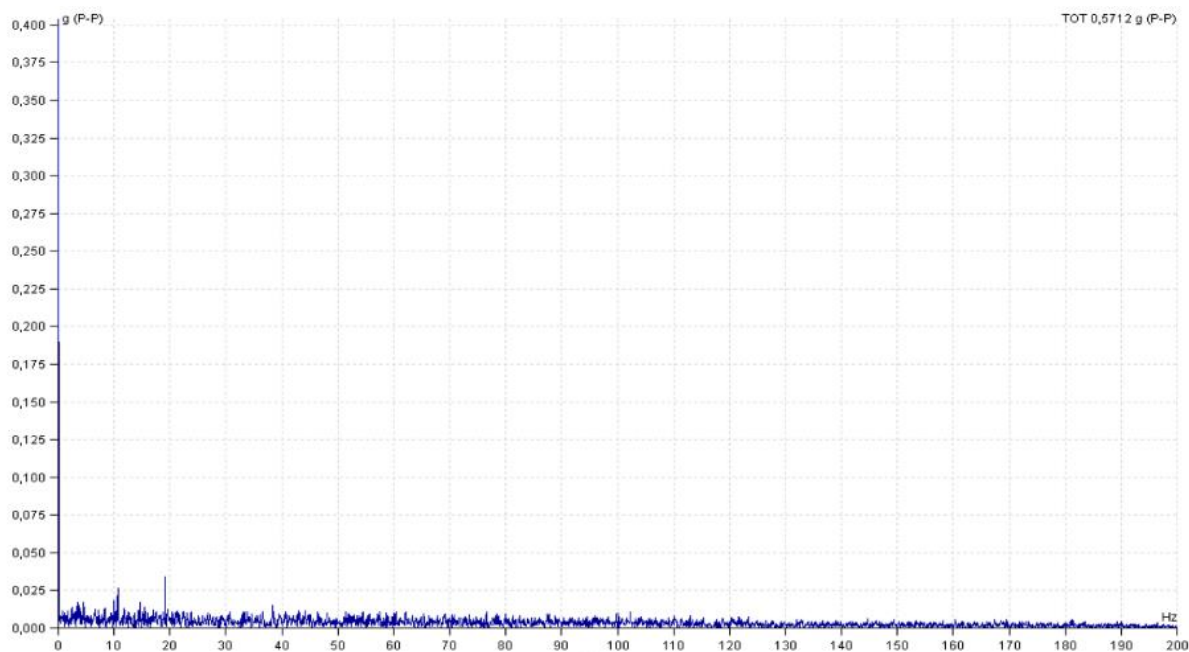
Obr. 36) Spektrum obálky zrychlení vibrací filtrem 3 CEN SP před výměnou

Na obrázku 37 je detail nejvyšší špičky ze spektra obálky. Na obrázku jsou patrné postranní pásma ve vzdálenosti podobné otáčkové frekvenci. Při přiblížení libovolné špičky na násobcích frekvence 23,5 je situace velmi podobná.



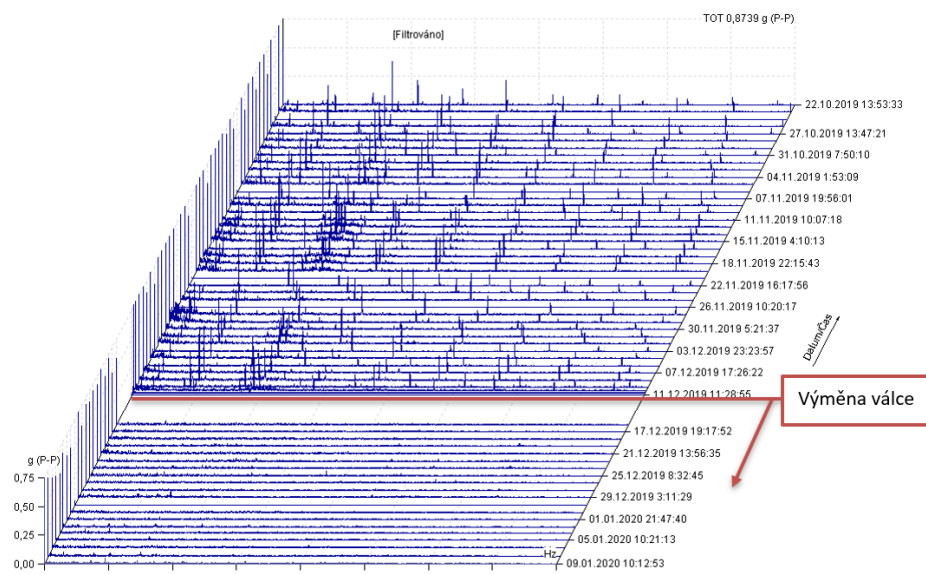
Obr. 37) Spektrum obálky zrychlení vibrací CEN SP před výměnou přiblíženo na nejvyšší špičku

Ve spektru obálky zrychlení vibrací filtrem tři změřeném po výměně centrálního válce 38 nejsou patrné žádné násobky harmonické frekvence, které by odpovídaly poškození ložiska. Spektrum je úmyslně přiblíženo stejným způsobem jako spektrum před výměnou, aby byl na první pohled zřetelný rozdíl.



Obr. 38) Spektrum obálky zrychlení vibrací filtrem 3 CEN SP po výměně

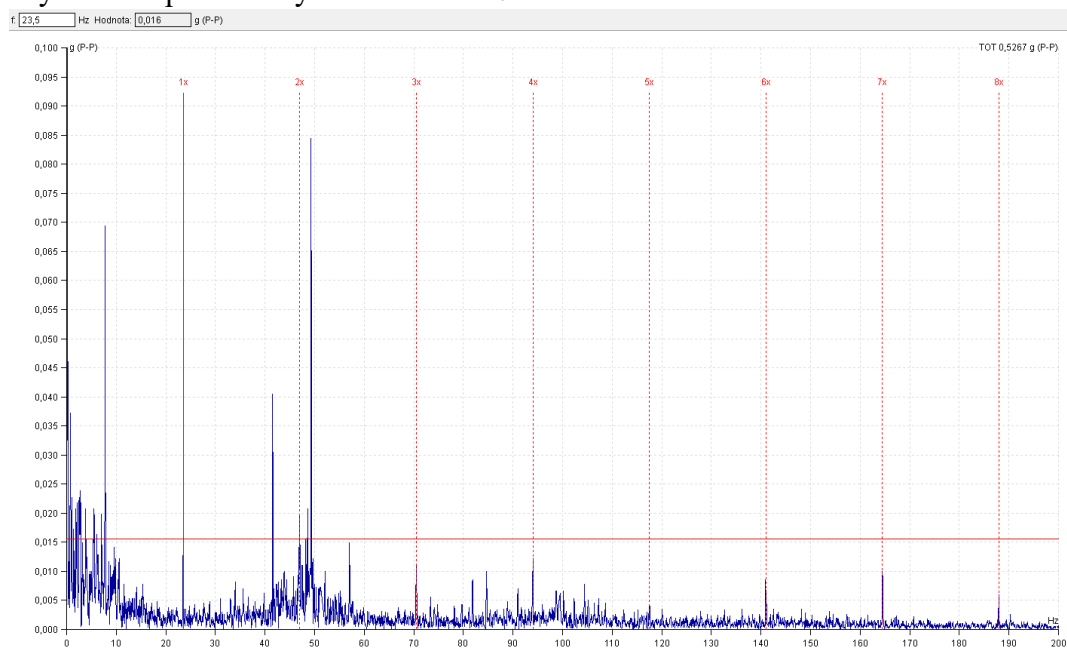
Na obrázku 39 jsou vykresleny spektra obálek zrychlení vibrací filtrem tři v čase. Po výměně válce lze pozorovat zmizení harmonických frekvencí 23,5 Hz.



Obr. 39) Kaskáda spekter obálek zrychlení vibrací CEN SP v čase

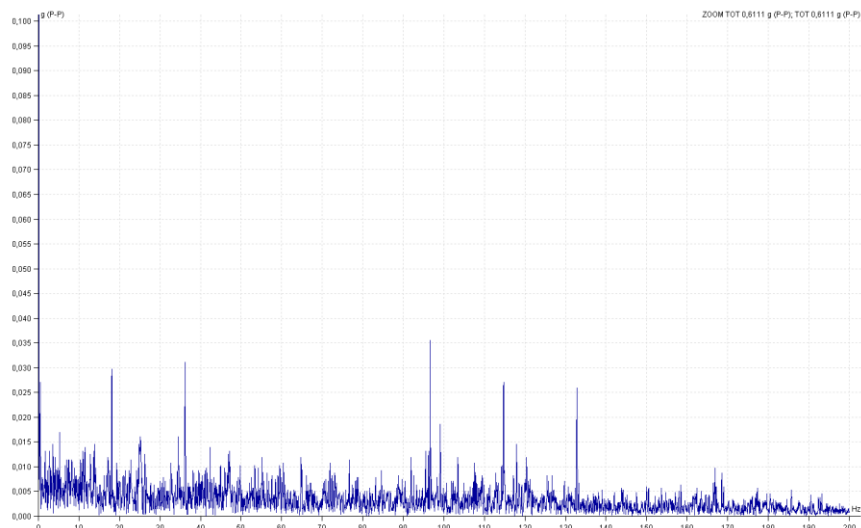
7.5 Obálková metoda hodnoty špička-špička zrychlení vibrací filtrem 2

Na obrázku 40 je zobrazeno spektrum obálky zrychlení filtrem 2 a v něm přítomny harmonické násobky frekvence 23,5 Hz. Jelikož je poškození patrné i ve filtru 2, a přes celé měřené pásmo jedná se pravděpodobně o opotřebení ložiska v pokročilém stavu. Největší amplituda dosahuje hodnoty 0,084 g, ale nejedná se o špičku na násobcích poruchové frekvence. Nejvyšší špička na násobcích poruchové frekvence má hodnotu 0,135 g. Špičky nalezeny na poruchové frekvenci vnitřního kroužku ložiska v tomto spektru dosahují mnohem menších hodnot než hodnoty ve spektru filtru 3 a jsou částečně zastíněny vyššími amplitudami. Důvod přítomnosti těchto vyšších amplitud nebyl identifikován.



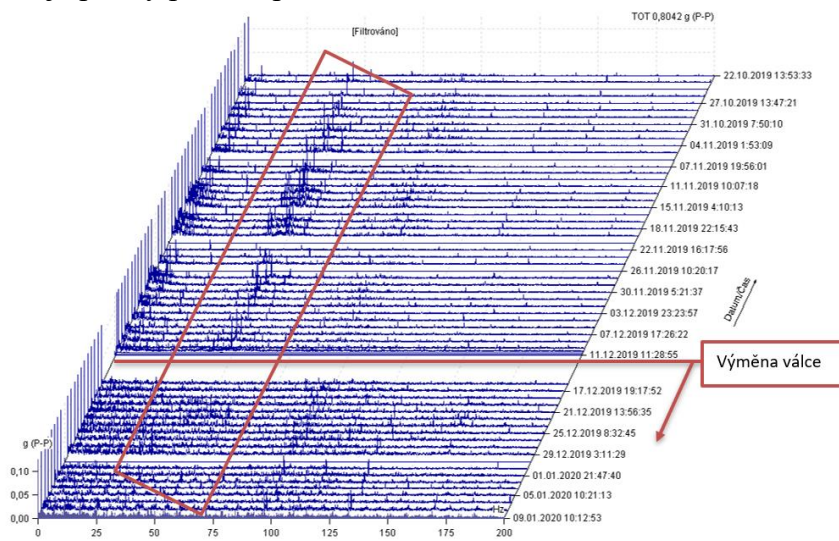
Obr. 40) Spektrum obálky zrychlení vibrací filtrem 2 CEN SP před výměnou

Na spektru obálky zrychlení vibrací centrálního válce na straně pohonu filtrem dva (obr. 41), změřeném po výměně centrálního válce, nejsou patrné žádné harmonické frekvence, které by vypovídaly o poškození ložiska. Nejvyšší amplituda dosahuje přibližně hodnoty 0,037 g. Spektrum je úmyslně přiblíženo stejným způsobem jako spektrum před výměnou, aby byl na první pohled patrný rozdíl.



Obr. 41) Spektrum obálky zrychlení vibrací filtrem 2 CEN SP po výměně

Na obrázku 42 lze vidět spektra obálky vibrací filtrem dva v čase. Po výměně centrálního válce je patrný pokles špiček v okolí frekvence 40 až 50 Hz.

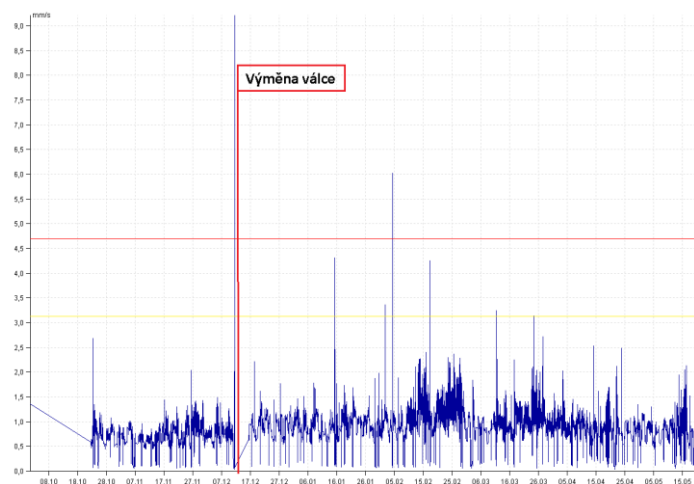


Obr. 42) Spektrum obálky zrychlení vibrací filtrem 2 CEN SP

7.6 Trend celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací

Na obrázku 43 je zobrazen trend efektivní hodnoty rychlosti vibrací centrálního válce a zvýrazněna doba výměny válce. V trendu je možné pozorovat, že po výměně centrálního válce nedošlo ke snížení celkových efektivních hodnot rychlosti vibrací.

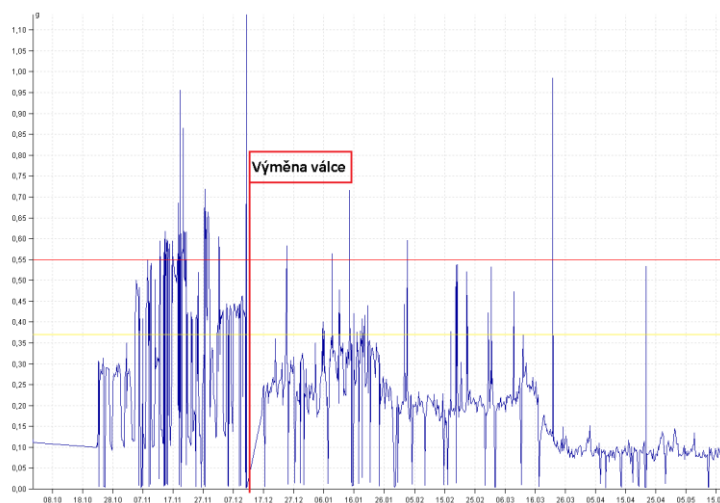
Vysoké špičky, které se v trendech objevují napříč pásmem, jsou pravděpodobně způsobeny vibracemi zanesenými do měření při odstávkách a extrémních situacích, které nemají nic společného s běžným provozem stroje. Například špička těsně před výměnou centrálního válce dosahuje hodnoty až 36 mm/s.



Obr. 43) Trend celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací CEN SP

7.7 Trend celkové hodnoty špičky zrychlení vibrací

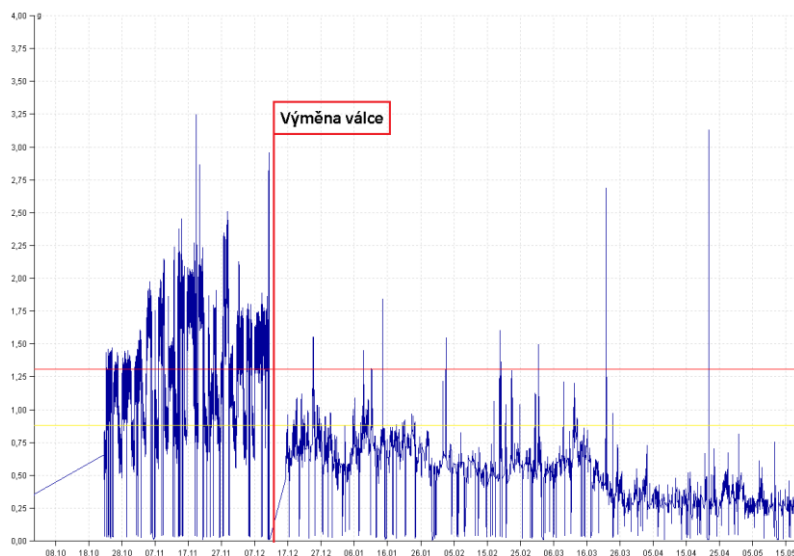
Na obrázku 44 lze vidět trend špičky zrychlení vibrací ložiska centrálního válce na straně pohonu. Ve trendu lze pozorovat snížení celkové hodnoty zrychlení vibrací po výměně centrálního válce a další výrazné snížení hodnoty koncem měsíce března 2020. Druhé snížení je pravděpodobně způsobeno zaběhnutím zařízení. Vysoké špičky, které lze pozorovat napříč celým spektrem nejsou pravděpodobně způsobeny běžným provozem, ale extrémními podmínkami, jako jsou například odstávky.



Obr. 44) Trend celkové hodnoty 0-P zrychlení vibrací CEN SP

7.8 Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací filtrem 3

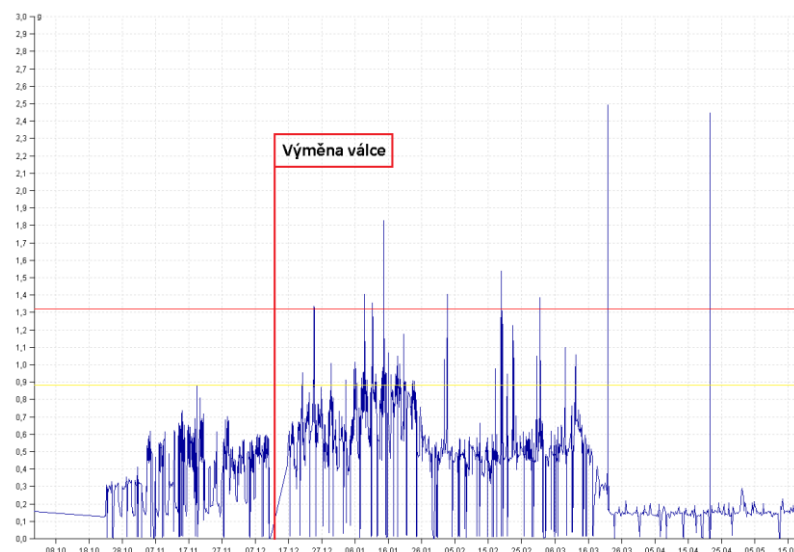
Na obrázku 45 je trend obálky zrychlení vibrací filtrem 3 ložiska centrálního válce na straně pohonu. Je patrné výrazné snížení hodnot po výměně centrální válce. Od výměny válce dochází k dalšímu postupnému snižování hodnot, které je pravděpodobně způsobeno zaběháváním nového zařízení. V trendu jsou patrné vysoké hodnoty, které pravděpodobně nemají nic společného s běžným provozem a jsou způsobeny extrémními podmínkami, které mohou nastat například při odstávkách.



Obr. 45) Trend obálky zrychlení filtrem 3 ložiska CEN SP

7.9 Trend celkové hodnoty špička-špička obálky zrychlení vibrací filtrem 2

Na obrázku 46 je zobrazen trend celkové hodnoty obálky zrychlení filtrem 2 ložiska centrálního válce na straně pohonu. Po výměně válce lze pozorovat navýšení celkových hodnot, které trvá až do konce ledna 2020, po kterém lze pozorovat snížení hodnot. Další výrazné snížení hodnot lze pozorovat koncem března 2020. Tato křivka je pravděpodobně způsobena zaběháváním nového zařízení.

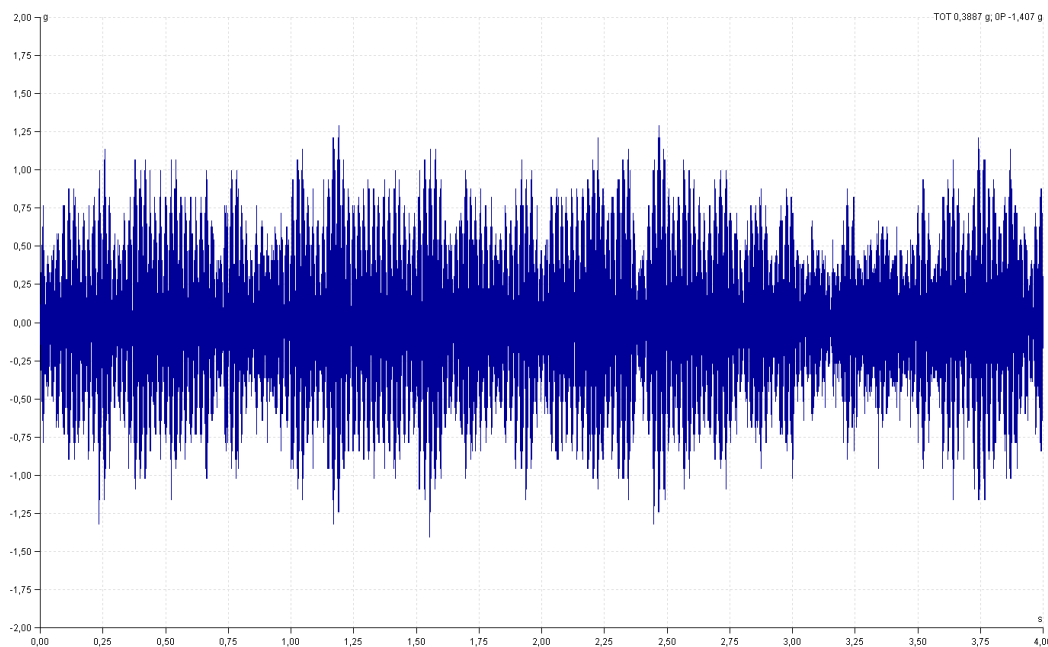


Obr. 46) Trend celkové hodnoty obálky zrychlení vibrací filtrem dva CEN SP

7.10 Časový záznam rychlosti vibrací

Na obrázku 47 lze vidět časový záznam rychlosti vibrací. Časový záznam rychlosti vibrací slouží pro pokročilou expertízu. Na časovém záznamu rychlosti vibrací nejsou patrné žádné známky poškození ložiska.

Jedná se o surové data vhodné pro další analýzu.



Obr. 47) Časový záznam rychlosti vibrací CEN SP před výměnou

7.11 Schnutí měření ložiska centrálního válce na straně pohonu

Díky správně zvoleným metodám pro měření a diagnostiku daného zařízení, byla včas zjištěna závada vnitřního kroužku ložiska centrálního válce na straně pohonu. Díky tomu mohla být dopředu naplánována výměna a předešlo se neplánovanému prostoji způsobeného havárií zařízení.

8 SESTAVENÍ MEZNÍCH HODNOT CENTRÁLNÍHO VÁLCE PO VÝMĚNĚ

V současném stavu jsou nastaveny alarmové hodnoty všech monitorovaných válců papírenského stroje. Jako podklad pro nastavení hodnot sloužila měření prováděná pochůzkou. Bohužel v tomto měření není zohledněna proměnlivá rychlost otáček, která má na velikost vibrací u pomaloběžných strojů nezanedbatelný vliv.

Dle normy ČSN ISO 20186 jsou efektivní hodnoty rychlosti vibrací strojů rozděleny na 4 základní pásma (obr. 48). **Osy X tohoto obrázku označuje frekvenci a osa Y efektivní hodnotu rychlosti vibrací.** [26]

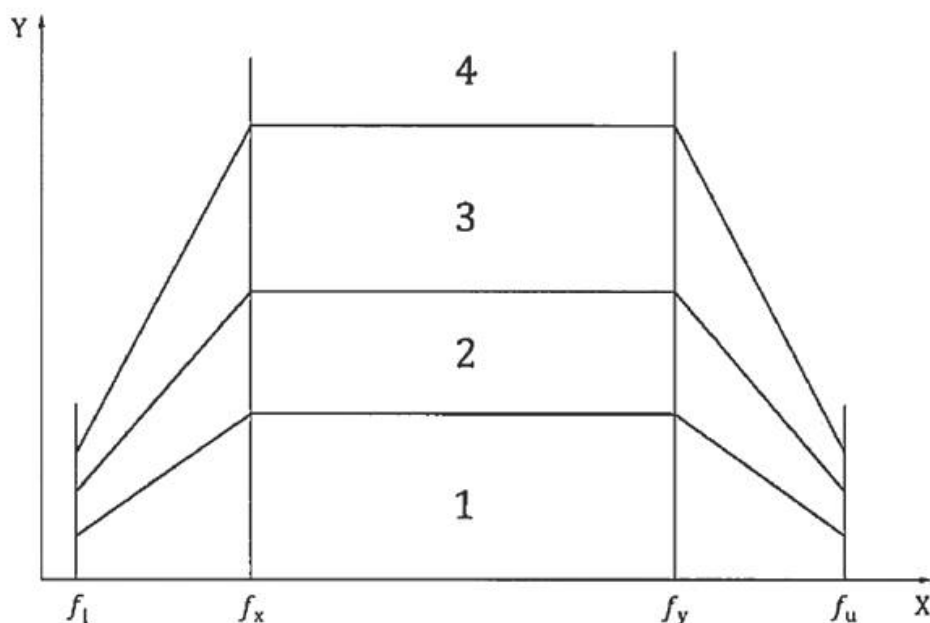
Pásmo 1 označuje vibrace nacházející se u kompletně nových zařízení. Tyto vibrace jsou dlouhodobě téměř neudržitelné, očekává se, že používáním stroje hodnoty vibrací přesáhnou horní mez tohoto pásma. Úsilí pro udržení hodnot vibrací v tomto pásmu bývá finančně příliš náročné a není tak důležité. [26]

Do **pásma 2** spadají vibrace strojů, které zpravidla nezpůsobují poruchu. Stroje vykazující vibrace spadající do pásma dva mohou být pravděpodobně provozovány bezporuchově po neomezeně dlouhou dobu. [26]

Do **pásma 3** spadají vibrace, které lze považovat za nevyhovující pro dlouhodobý provoz stroje. Obecně platí, že stroje vykazující vibrace z tohoto pásma mohou být provozovány, ale po omezeně dlouhou dobu. Doporučuje se naplánovat a provést nápravnou akci. [26]

Do **pásma 4** spadají vibrace, které jsou považovány za dostatečně závažné. Stroji, který vykazuje takové vibrace hrozí poškození a je doporučeno ho v co nejkratší době odstavit.

Předpokládá se, že nárůst hodnot vibrací postupuje velmi podobně i u ostatní veličin vibrodiagnostiky, nejen u efektivní hodnoty rychlosti vibrací.



Obr. 48) Rozdělení efektivní hodnoty rychlosti vibrací [26]

Jak bylo zmíněno v kapitole 7, na základě měření centrálního válce a diagnostikování poškození vnitřního kroužku ložiska na straně pohonu proběhla 11.12.2019 odstávka, na které došlo k výměně starého centrálního válce za nový.

I přesto, že byl na papírenský stroj nasazen nový válec, nedá se na vibrace, změřené na jeho ložiscích, pohlížet jako na vibrace spadající do pásma 1, tedy jako na vibrace úplně nového zařízení. Sice nový, centrální válec byl nainstalován na starý papírenský stroj a je v neustálém kontaktu přes plstěnce s dalšími dvěma válci a s tekoucí papírovinou.

K byly použity následující vzorce a veličiny:

$\theta_{v_i}^{RMS}$	–	Efektivní hodnota rychlosti vibrací
$\theta_{a_i}^{0-P}$	–	Špičková hodnota zrychlení vibrací
$\theta_{EN3\ a_i}^{P-P}$	–	Hodnota špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$\theta_{EN2\ a_i}^{P-P}$	–	Hodnota špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací
$\overline{\theta_v^{RMS}}$	–	Průměrná efektivní hodnota rychlosti vibrací
$\overline{\theta_{a_i}^{0-P}}$	–	Průměrná špičková hodnota zrychlení vibrací
$\overline{\theta_{EN3\ a_i}^{P-P}}$	–	Hodnota špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$\overline{\theta_{EN2\ a_i}^{P-P}}$	–	Hodnota špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací
$S_{\theta_v^{RMS}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka efektivní hodnoty rychlosti vibrací
$S_{\theta_{a_i}^{0-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka špičkové hodnoty zrychlení vibrací
$S_{\theta_{EN3\ a_i}^{P-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka hodnoty špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$S_{\theta_{EN2\ a_i}^{P-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka hodnoty špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací

Výpočet průměrné efektivní hodnoty rychlosti vibrací byl proveden dle vzorce (22):

$$\overline{\theta_v^{RMS}} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{v_i}^{RMS}}{n} \quad (22)$$

Výpočet výběrové směrodatné odchylky efektivní hodnoty rychlosti vibrací byl proveden dle vzorce (23):

$$S_{\theta_v^{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{v_i}^{RMS} - \overline{\theta_v^{RMS}})^2}{n-1}} \quad (23)$$

Výpočet průměrné špičkové hodnoty zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (24):

$$\overline{\theta_a^{0-P}} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{a_i}^{0-P}}{n} \quad (24)$$

Výpočet výběrové směrodatné odchylky špičkové hodnoty zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (25):

$$S_{\theta_a^{0-P}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{a_i}^{0-P} - \overline{\theta_a^{0-P}})^2}{n-1}} \quad (25)$$

Výpočet průměrné hodnoty špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (26):

$$\overline{\theta_{EN3 a_i}^{P-P}} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{EN3 a_i}^{P-P}}{n} \quad (26)$$

Výpočet výběrové směrodatné odchylky hodnoty špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (27):

$$S_{\theta_{EN3 a}^{P-P}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{EN3 a_i}^{P-P} - \overline{\theta_{EN3 a}^{P-P}})^2}{n-1}} \quad (27)$$

Výpočet průměrné hodnoty špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (28):

$$\overline{\theta_{EN2 a}^{P-P}} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{EN2 a_i}^{P-P}}{n} \quad (28)$$

Výpočet výběrové směrodatné odchylky hodnoty špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací byl proveden dle vzorce (29):

$$S_{\theta_{EN2 a}^{P-P}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{EN2 a_i}^{P-P} - \overline{\theta_{EN2 a}^{P-P}})^2}{n-1}} \quad (29)$$

8.1 Navržený postup pro stanovení mezí

Hodnoty pro výpočet vzorců (22 až 29) jsou v tabulkách 11 až 14. Pro každou tabulku byl nejdříve vypočten aritmetický průměr všech hodnot. Pak byla stanovena hranice platných měření tím, že se aritmetický průměr vydělil dvěma. Všechna měření s hodnotou menší, než toto číslo byla považována za neplatná. Většinou se jednalo o chyby v měření nebo o měření za odstávky (neprovozní měření). Horní hranice platnosti nebyla stanovena. Ostatně žádné hodnoty nepřesahovaly průměrnou hodnotu o více než dvakrát, takže nedošlo k zanesení chybných dat do systému pro stanovení mezí.

Z platných hodnot byl dále vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Hranice provozních vibrací byla stanovena rovnicí (30):

$$\bar{\theta}^{PROVOZNÍ} = \bar{\theta} + 3 \cdot s_{\theta} \quad (30)$$

Hranice nevyhovujících vibrací byla stanovena vzorcem (31):

$$\bar{\theta}^{NEVYHOVUJÍCÍ} = 3 \cdot \bar{\theta} \quad (31)$$

Pro výpočet mezí byly vybrány hodnoty od 5.4.2020 do 14.4.2020. Toto období bylo zvoleno na základě zkoumání trendů v kapitole 7, protože na přelomu měsíce března a dubna došlo k ustálení do té doby klesajících hodnot vibrací. Toto klesání bylo nejspíše způsobeno záběhem nového zařízení.

8.2 Stanovení mezních efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce

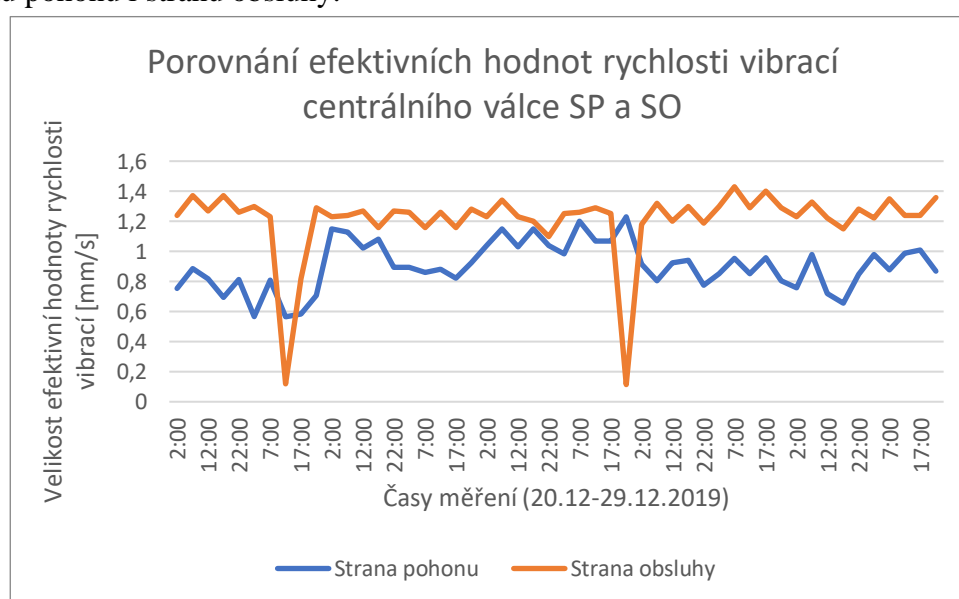
Pro hlídání trendů efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce byly jak pro stranu pohonu, tak pro stranu obsluhy doporučeny meze zapsané v tabulce 11. K těmto mezím byly použity informace obsažené v této tabulce.

Dle obrázku 43 se trend RMS hodnot rychlosti vibrací ustálil hned po výměně válce, proto byl hned po výměně vypočítán nový trend hodnot. K jeho zavedení byla použita data od 20.12-29.12.2019.

Tab 11) Tabulka původních dat a vypočtených hodnot pro stanovení mezí efektivních hodnot rychlostí vibrací centrálního válce [mm/s]

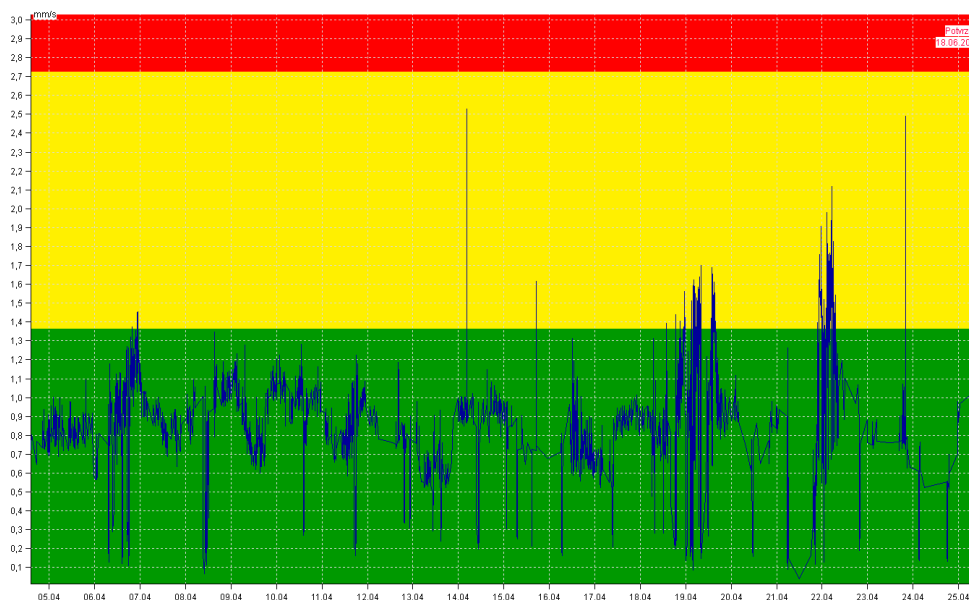
Datum\čas	Strana pohonu					Strana obsluhy				
	2:00	7:00	12:00	17:00	22:00	2:00	7:00	12:00	17:00	22:00
05.04.2020	0,755	0,884	0,816	0,694	0,815	1,24	1,37	1,27	1,37	1,26
06.04.2020	0,567	0,807	0,565	0,585	0,708	1,3	1,23	0,118	0,817	1,29
07.04.2020	1,15	1,13	1,02	1,08	0,894	1,23	1,24	1,27	1,16	1,27
08.04.2020	0,896	0,859	0,883	0,821	0,924	1,26	1,16	1,26	1,16	1,28
09.04.2020	1,04	1,15	1,03	1,15	1,04	1,23	1,34	1,23	1,2	1,1
10.04.2020	0,985	1,2	1,07	1,07	1,23	1,25	1,26	1,29	1,25	0,114
11.04.2020	0,916	0,803	0,924	0,942	0,776	1,18	1,32	1,2	1,3	1,19
12.04.2020	0,85	0,952	0,851	0,958	0,804	1,3	1,43	1,29	1,4	1,29
13.04.2020	0,756	0,98	0,721	0,656	0,848	1,23	1,33	1,22	1,15	1,28
14.04.2020	0,979	0,877	0,989	1,01	0,868	1,22	1,35	1,24	1,24	1,36
Průměr	0,906					1,207				
Hranice platných měření	0,453					0,603				
Počet platných měření	48					48				
Průměr z platných měření	0,906					1,252				
Směrodatná odchylka z platných měření	0,148					0,093				
Hranice provozních vibrací	1,351					1,530				
Hranice nevyhovujících vibrací	2,718					3,757				

Na obrázku 49 lze vidět srovnávací graf efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce po jeho výměně, ze kterých byly dále vypočteny meze. Z obrázku lze pozorovat, že vibrace na straně obsluhy jsou větší než na straně pohonu. Proto je nutné vypočítat zvlášť meze pro stranu pohonu i stranu obsluhy.



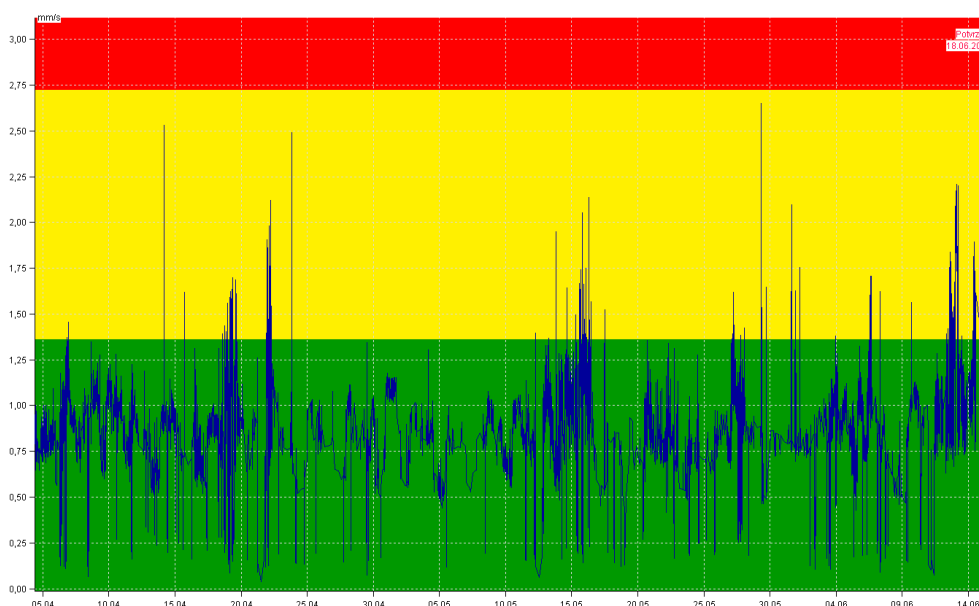
Obr. 49) Porovnávací graf efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce SP a SO

Na obrázku 50 lze vidět trend efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce na straně pohonu po výměně válce s nastavenými novými mezními hodnotami. Tento trend zkoumá RMS rychlosti vibrací krátce po nastavení nových mezních hodnot. Krátce po vypočtení nových mezních hodnot začaly hodnoty vibrací zasahovat do pásma nevyhovujících vibrací. Nastává otázka, zdali nebyly mezní hodnoty nastaveny příliš přísně.



Obr. 50) Trend efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-25.4.2020)

Obrázek 51 zobrazuje stejný trend, jako na obrázku 50, po delší časový úsek. Lze pozorovat, že hodnoty vibrací způsobené provozováním zařízení v určitých obdobích trvale zasahují do pásma nevyhovujících vibrací. Po detailním prozkoumání spekter se zdá, že válec zatím neprojevuje žádné známky poškození ložisek. Proto je třeba zvážit nové přepočítání mezních hodnot.



Obr. 51) Trend efektivních hodnot rychlosti vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-14.6.2020)

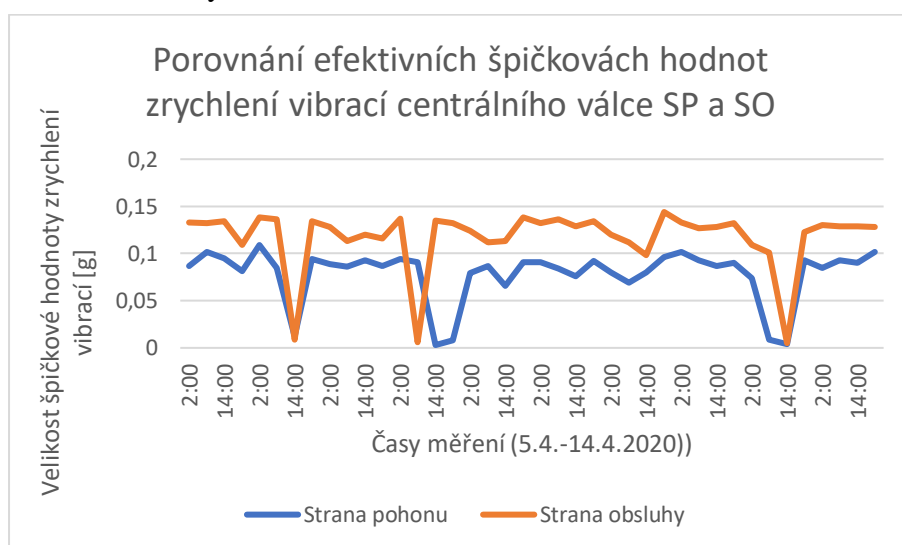
8.3 Stanovení mezních špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce

Pro hlídání trendů špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce byly jak pro stranu pohonu, tak pro stranu obsluhy doporučeny meze zapsané v tabulce 12. K těmto mezím byly použity informace obsažené v této tabulce.

Tab 12) Tabulka původních dat a vypočtených hodnot pro stanovení mezí špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce [g]

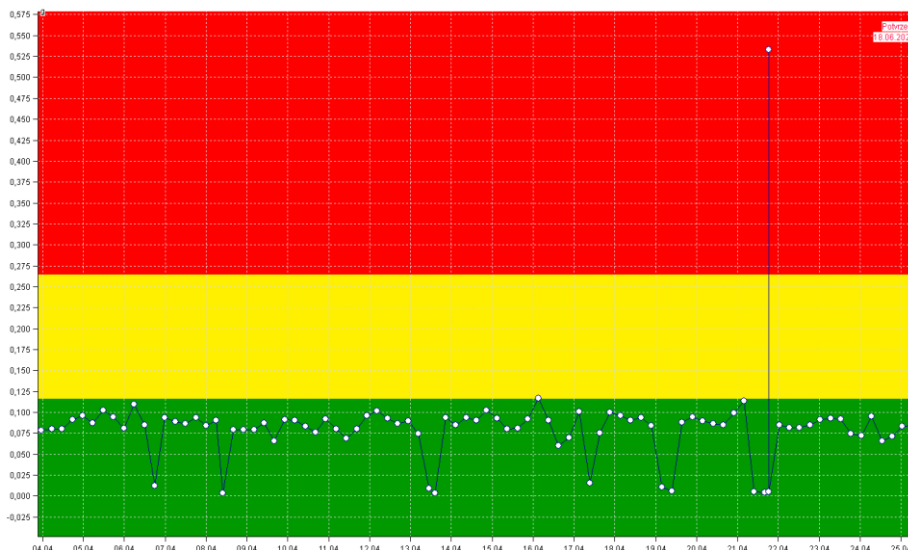
Datum\čas	Strana pohonu				Strana obsluhy			
	2:00	8:00	14:00	20:00	2:00	8:00	14:00	20:00
05.04.2020	0,087	0,102	0,095	0,081	0,133	0,132	0,134	0,109
06.04.2020	0,109	0,085	0,012	0,094	0,138	0,136	0,009	0,134
07.04.2020	0,089	0,086	0,093	0,087	0,128	0,113	0,12	0,116
08.04.2020	0,094	0,091	0,003	0,008	0,137	0,006	0,135	0,132
09.04.2020	0,079	0,087	0,066	0,091	0,124	0,112	0,113	0,138
10.04.2020	0,091	0,084	0,076	0,092	0,132	0,136	0,129	0,134
11.04.2020	0,08	0,069	0,08	0,096	0,12	0,112	0,098	0,144
12.04.2020	0,102	0,093	0,087	0,09	0,133	0,127	0,128	0,132
13.04.2020	0,074	0,009	0,004	0,093	0,109	0,101	0,005	0,123
14.04.2020	0,085	0,093	0,09	0,102	0,13	0,129	0,129	0,128
Průměr	0,078				0,117			
Hranice platných měření	0,039				0,058			
Počet platných měření	34				34			
Průměr z platných měření	0,088				0,126			
Směrodatná odchylka z platných měření	0,009				0,011			
Hranice provozních vibrací	0,116				0,158			
Hranice nevyhovujících vibrací	0,265				0,379			

Na obrázku 52 lze vidět srovnávací graf špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce po jeho výměně, ze kterých byly dále vypočteny meze. Z obrázku lze pozorovat, že vibrace na straně obsluhy jsou větší než na straně pohonu. Proto je nutné vypočítat zvlášť meze pro stranu pohonu i stranu obsluhy.



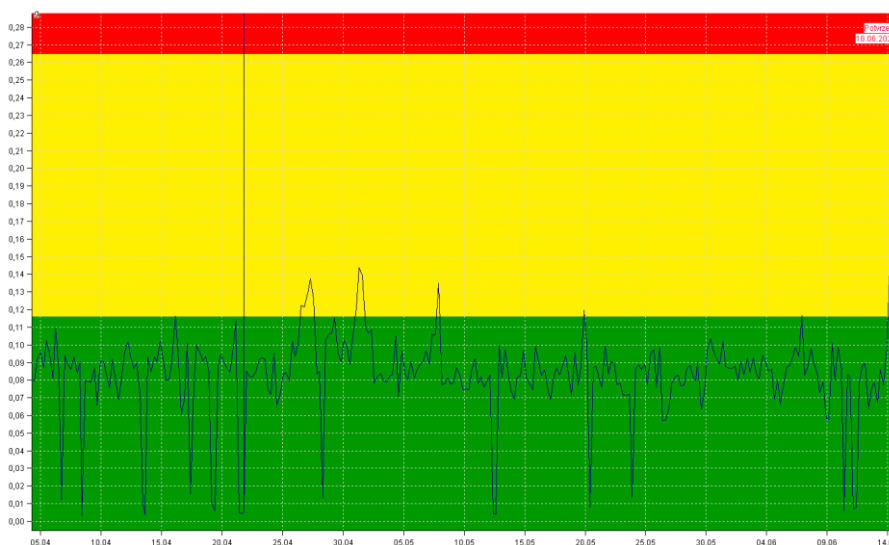
Obr. 52) Porovnávací graf špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce SP a SO

Na obrázku 53 lze vidět trend špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce na straně pohonu po výměně válce s nastavenými novými mezními hodnotami. Tento trend zkoumá špičkové hodnoty zrychlení vibrací krátce po nastavení nových mezních hodnot. Na trendu je patrná vysoká hodnota změřená 21.4.2020, která zasahuje až do pásma závažných vibrací. Tato špička byla způsobena v období odstávky stroje a není způsobena běžných provozem. Zdá se, že meze byly nastaveny správně. Nastavení mezí se však může časem optimalizovat.



Obr. 53) Trend špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-25.4.2020)

Obrázek 54 zobrazuje stejný trend jako obrázek 53 v delším časovém úseku. Většina bodů se nachází v pásnu provozních vibrací, do pásnu nevyhovujících vibrací se dostalo jen několik málo bodů. Zdá se, že meze byly nastaveny správně. Nastavení mezí se však může časem optimalizovat.



Obr. 54) Trend špičkových hodnot zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-14.6.2020)

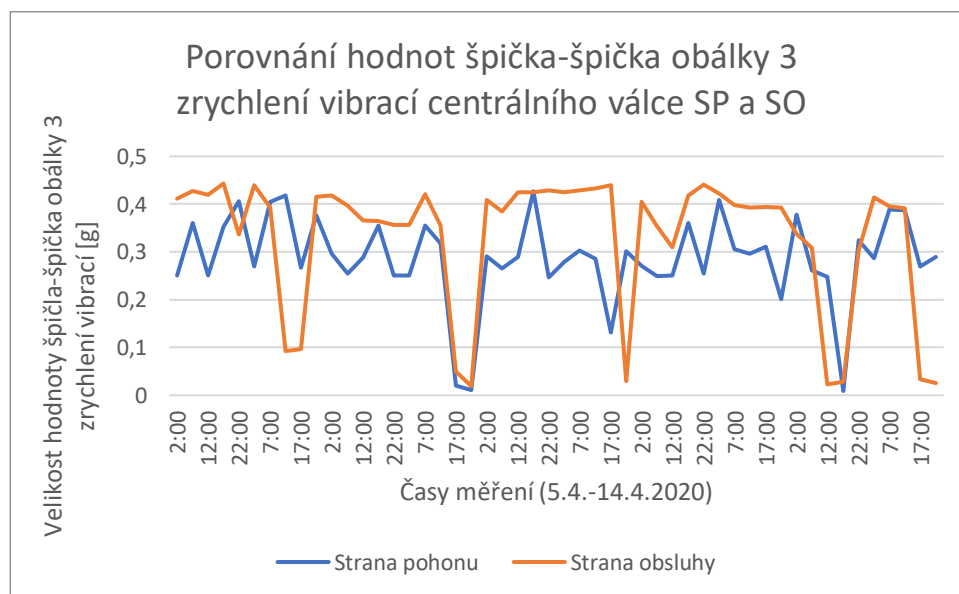
8.4 Stanovení mezních hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce

Pro hlídání trendů hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce byly jak pro stranu pohonu, tak pro stranu obsluhy doporučeny meze zapsané v tabulce 13. K těmto mezím byly použity informace obsažené v této tabulce.

Tab 13) Tabulka původních dat a vypočtených hodnot pro stanovení mezí hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce [g]

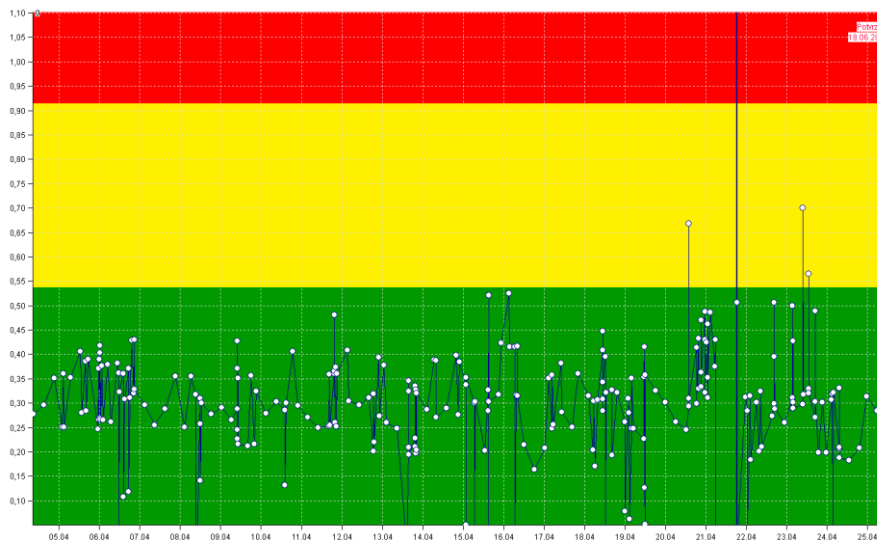
Datum\čas	Strana pohonu					Strana obsluhy				
	2:00	7:00	12:00	17:00	22:00	2:00	7:00	12:00	17:00	22:00
05.04.2020	0,251	0,36	0,251	0,352	0,406	0,412	0,427	0,42	0,443	0,337
06.04.2020	0,269	0,404	0,418	0,267	0,376	0,439	0,393	0,093	0,096	0,416
07.04.2020	0,296	0,255	0,288	0,355	0,251	0,418	0,397	0,366	0,365	0,357
08.04.2020	0,251	0,355	0,317	0,02	0,011	0,357	0,421	0,355	0,049	0,019
09.04.2020	0,291	0,265	0,289	0,427	0,246	0,409	0,385	0,425	0,425	0,429
10.04.2020	0,279	0,303	0,286	0,132	0,301	0,425	0,429	0,433	0,439	0,029
11.04.2020	0,271	0,249	0,251	0,36	0,255	0,405	0,354	0,309	0,418	0,441
12.04.2020	0,409	0,305	0,296	0,311	0,201	0,422	0,398	0,392	0,394	0,393
13.04.2020	0,378	0,261	0,248	0,009	0,324	0,338	0,308	0,023	0,028	0,303
14.04.2020	0,287	0,389	0,387	0,27	0,29	0,414	0,395	0,391	0,033	0,025
Průměr	0,286					0,332				
Hranice platných měření	0,143					0,166				
Počet platných měření	44					44				
Průměr z platných měření	0,304					0,373				
Směrodatná odchylka z platných měření	0,078					0,105				
Hranice provozních vibrací	0,537					0,689				
Hranice nevyhovujících vibrací	0,913					1,118				

Na obrázku 55 lze vidět srovnávací graf hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce po jeho výměně, ze kterých byly dále vypočteny meze. Z obrázku lze pozorovat, že vibrace na straně obsluhy jsou větší než na straně pohonu. Proto je nutné vypočítat zvlášť meze pro stranu pohonu i stranu obsluhy.



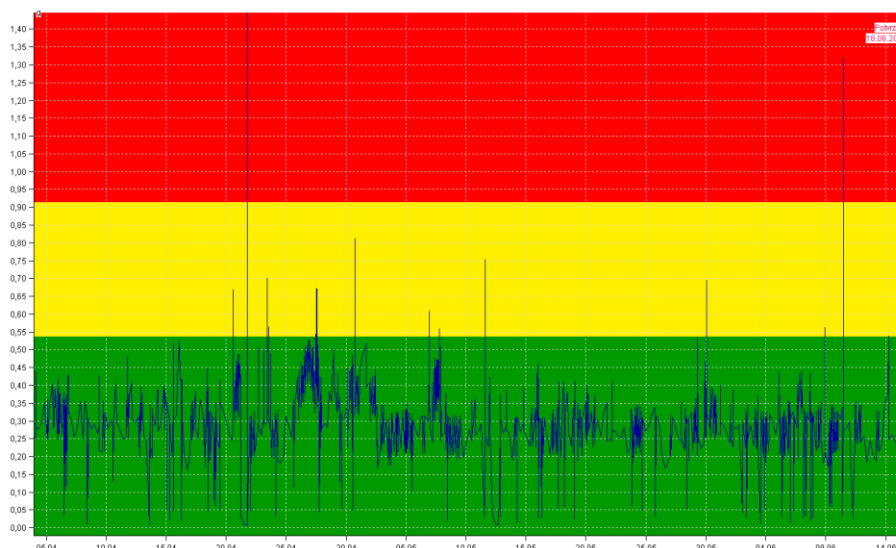
Obr. 55) Porovnání grafů hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce SP a SO

Na obrázku 56 lze vidět trend hodnot špička-špička zrychlení vibrací centrálního válce na straně pohonu po výměně válce s nastavenými novými mezními hodnotami. Tento trend popisuje hodnoty špička-špička zrychlení vibrací krátce po nastavení nových mezních hodnot. Na trendu je patrná vysoká hodnota změřená 21.4.2020, která zasahuje až do pásma závažných vibrací. Tato špička byla způsobena v období odstávky stroje a není způsobena běžných provozem. Zdá se, že meze byly nastaveny správně. Nastavení mezí se však může časem optimalizovat.



Obr. 56) Trend hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-25.4.2020)

Obrázek 57 zobrazuje stejný trend jako obrázek 56 v delším časovém úseku. Většina bodů se nachází v pásmu provozních vibrací, do pásma nevyhovujících vibrací se dostalo jen několik málo bodů. První ze dvou bodů sahající do pásma závažných vibrací byl způsoben na odstávce a nesouvisí s běžným provozem stroje. Druhý bod sahající do pásma závažných vibrací, změřený 10.6.2020 nebyl nijak vysvětlen. V tomto období se ale ve spektrech nevyskytovaly žádné anomálie. Zdá se, že meze byly nastaveny správně. Nastavení mezí se však může časem optimalizovat



Obr. 57) Trend hodnot špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-14.6.2020)

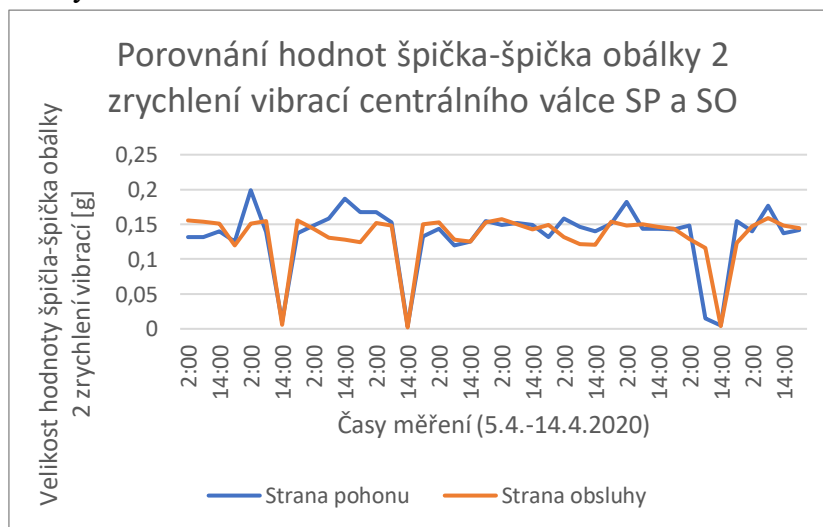
8.5 Stanovení mezních hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce

Pro hlídání trendů hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce byly jak pro stranu pohonu, tak pro stranu obsluhy doporučeny meze zapsané v tabulce 14. K těmto mezím byly použity informace obsažené v této tabulce.

Tab 14) Tabulka původních dat a vypočtených hodnot pro stanovení mezí hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce. [g]

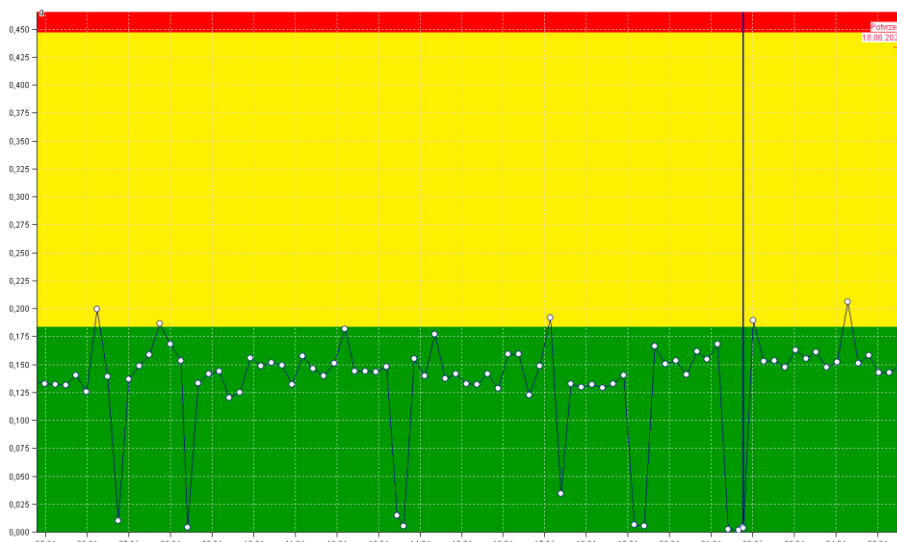
Datum\čas	Strana pohonu				Strana obsluhy			
	2:00	8:00	14:00	20:00	2:00	8:00	14:00	20:00
05.04.2020	0,132	0,132	0,14	0,125	0,156	0,154	0,151	0,12
06.04.2020	0,199	0,139	0,01	0,137	0,151	0,155	0,006	0,156
07.04.2020	0,148	0,158	0,187	0,168	0,144	0,131	0,128	0,124
08.04.2020	0,168	0,153	0,004	0,133	0,152	0,148	0,002	0,15
09.04.2020	0,144	0,12	0,125	0,155	0,153	0,128	0,125	0,153
10.04.2020	0,149	0,152	0,149	0,132	0,157	0,15	0,143	0,149
11.04.2020	0,158	0,146	0,14	0,151	0,132	0,122	0,121	0,154
12.04.2020	0,182	0,144	0,144	0,143	0,148	0,15	0,146	0,144
13.04.2020	0,148	0,015	0,005	0,155	0,129	0,116	0,004	0,123
14.04.2020	0,14	0,177	0,137	0,142	0,147	0,159	0,148	0,145
Průměr	0,135				0,132			
Hranice platných měření	0,067				0,066			
Počet platných měření	36				36			
Průměr z platných měření	0,149				0,143			
Směrodatná odchylka z platných měření	0,017				0,012			
Hranice provozních vibrací	0,184				0,180			
Hranice nevyhovujících vibrací	0,446				0,429			

Na obrázku 58 lze vidět srovnávací graf hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce po jeho výměně, ze kterých byly dále vypočteny meze. Z obrázku lze usuzovat, že vibrace na straně obsluhy jsou velmi podobné vibracím na straně pohonu. Přesto byly vypočteny meze zvlášť jak pro stranu obsluhy, tak pro stranu pohonu, aby byl zachován jednotný systém pro celý centrální válec.



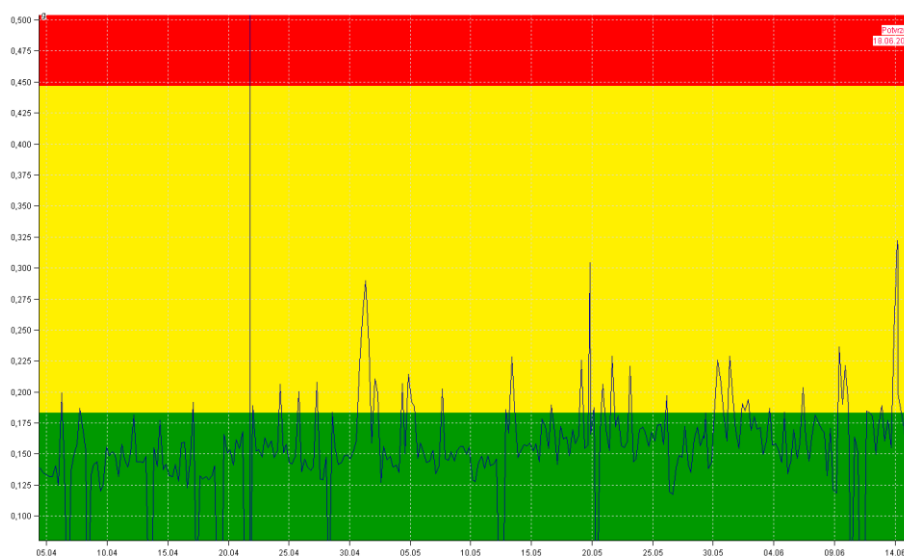
Obr. 58) Porovnání grafu hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce SP a SO

Na obrázku 59 lze vidět trend hodnot špička-špička zrychlení vibrací centrálního válce na straně pohonu po výměně válce s nastavenými novými mezními hodnotami. Tento trend popisuje hodnoty špička-špička zrychlení vibrací krátce po nastavení nových mezních hodnot. Na trendu je patrná vysoká hodnota změřená 21.4.2020, která zasahuje až do pásma závažných vibrací. Tato špička byla způsobena v období odstávky stroje a není způsobena běžným provozem. Zdá se, že meze byly nastaveny správně. Nastavení mezí se však může časem optimalizovat



Obr. 59) Trend hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-25.4.2020)

Obrázek 60 zobrazuje stejný trend jako obrázek 59 v delším časovém úseku. Na trendu je patrná vysoká hodnota změřená 21.4.2020, která zasahuje až do pásma závažných vibrací. Tato špička byla způsobena v období odstávky stroje a není způsobena běžným provozem. Z obrázku je patrné, že poměrně značná část hodnot sahá do pásma nevyhovujících vibrací. Ve spektrech však nebyly nalezeny žádné známky poškození ložiska. Pásma byla nastavená poměrně přísně a je pravděpodobné, že se časem budou přepočítávat.



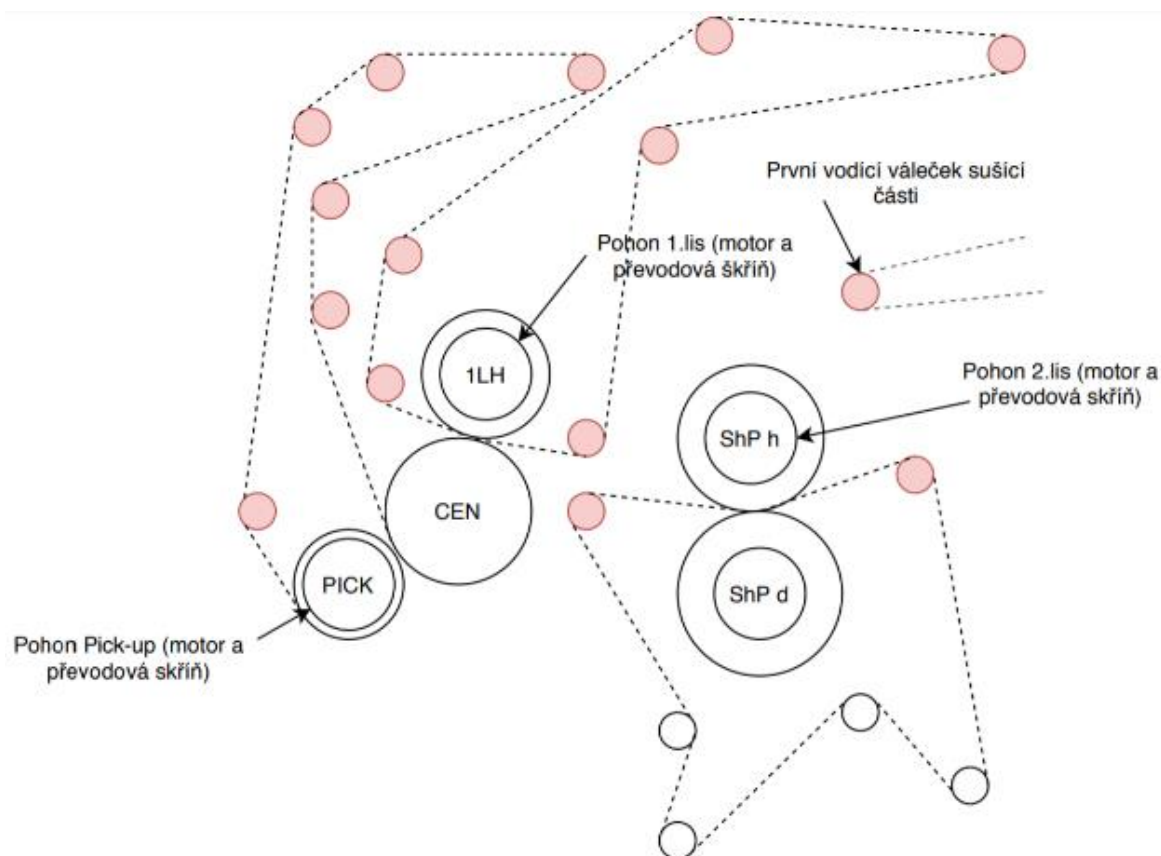
Obr. 60) Trend hodnot špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací centrálního válce SP po výměně s nastavenými novými mezními hodnotami (5.4.-14.6.2020)

9 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Ideální stav diagnostiky papírenského stroje je takový, že budou všechny měřící body monitorovány online a vyvedeny do jednoho softwaru DDS. Pochůzkové měření je však také velmi důležité. I v případě, že by všechny měřící body byly monitorovány online, nemůžou plně nahradit všechny postřehy a vizuální vjemy, které zkušený diagnostik pochytí při obchůzkovém měření. Proto by toto rozsáhlé online měření mělo být doplněno i pochůzkovým měřením, které by se zaměřilo na nejpodstatnější části papírenského stroje a vizuální kontrolu celého závodu. Tento stav je však z důvodu finanční náročnosti nereálný.

Jako ekonomicky výhodné se však zdá být rozšíření online monitorování na většinu vodících válečků v lisové části papírenského stroje a první vodící váleček sušící části, které jsou na obrázku 61 označeny červenou barvou. Vodící válečky na papírenském stroji nejsou monitorovány, jedná se o poměrně levný a snadno vyměnitelný díl. V případě poruchy jednoho z vyznačených válečků však může dojít k upadnutí materiálu, který může být následně vtáhnut mezi lisovací válce a tím může způsobit poškození lisů. V takovém případě se jedná o velmi drahou a náročnou opravu s velmi dlouhým neplánovaným prostojem.

Dále se doporučuje použít doporučené meze pro nový centrální lis a dodržovat stanovené algoritmy měření. K měření využít doporučených metod pro měření a vyhodnocení vibrací papírenského stroje, které jsou i s parametry měření zapsány v tabulce 9.



Obr. 61) Vodící válečky lisové části a první vodící váleček sušící části

10 ZÁVĚR

V zadání této diplomové práce bylo stanoveno 7 základních cílů.

Prvním cílem předložené diplomové práce byla rešerše v oblasti diagnostiky. Uvedené problematice je věnována druhá kapitola, ve které jsou objasněny pojmy a definovány oblasti technické diagnostiky. Třetí kapitola se zabývá výhradně tématem vibrační diagnostiky, na kterou se tato diplomová práce zaměřuje.

Druhým cílem práce je popis diagnostikovaných strojů. Tomuto cíli se věnuje pátá kapitola, která popisuje funkci a členění papírenského stroje a rozděluje všechny měřené body papírny do čtyř základních databází.

Třetím cílem této diplomové práce je popis metod diagnostiky pro monitorované stroje. Na tento cíl je zaměřena šestá kapitola. Detailně je tady popsána hlavně obálková metoda, která je klíčová pro diagnostiku pomaloběžných strojů.

Čtvrtý cíl, popis použitého diagnostického systému, je popsán v kapitole čtyři. Jsou zde definovány čtyři základní databáze a popsán rozdíl mezi starým a novým diagnostickým systémem.

Pátý cíl, vytvoření a popis vyhodnocovacích algoritmů, je splněn v šesté kapitole.

Šestým cílem je vyhodnocení testových měření a určení limitních úrovní pro hlavní válce (sušící a lisovací), vodící válce a pohony (motor a převodovka). Vyhodnocení testových měření pro lisovací válec je splněno v kapitole 8. Je zde provedena diagnostika ložiska centrálního válce na straně pohonu, která diagnostikuje poruchu vnitřního kroužku ložiska. Na základě tohoto měření byla provedena odstávka a vyměněn centrální válec. Poté bylo provedeno porovnání vibrací, které válec vykazoval před výměnou a po ní. V kapitole 8 pak byly pro již vyměněný válec sestaveny mezní hodnoty. Měření a sestavení mezních hodnot pro sušící válec, vodící válec a pro pohon je popsáno v příloze 2.

Posledním cílem této diplomové práce byl závěr a doporučení pro praxi. Doporučení pro praxi je věnována devátá kapitola, ve které je popsán ideální stav diagnostiky papírenského stroje. Dále je doporučeno finančně dostupné vylepšení, které by mohlo zamezit možné havárii lisové části.

Papírenský stroj se chová jako jeden dlouhý sériový systém, v případě poruchy jakékoliv části může dojít k zastavení provozu celého závodu. Proto je důležité věnovat velké úsilí diagnostice, která je při správném používání často schopna zachytit tyto poruchy už v počátku a zamezit zbytečným prostojům.

Přínosem této diplomové práce je sestavení a doporučení měřících algoritmů a vyhodnocovacích metod pro měření papírenského stroje. Dále stanovení a doporučení mezních hodnot vibrací pro nový centrální válec. V příloze 2 jsou dále doporučeny mezní hodnoty pro sušící válce na straně obsluhy, pohonu vratného válce a vodícího válečku nad klížícím lisem.

Složitý diagnostický systém, jako je ten v Smurfit Kappa Morava Paper vyžaduje neustálou pozornost diagnostiků. Do budoucna je třeba stanovit meze všech zbylých zařízení, především těch v databázi pochůzky SKMP, kde nejsou meze stanoveny vůbec.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN – technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [2] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [3] HAMMER, Miloš. Přednášky z předmětu: Technická diagnostika I (XT1). Vysoké učení technické v Brně.
- [4] HNĚTKOVSKÝ, Václav a Zdeněk TICHÝ (ed.). 1983. Papírenská příručka. Praha 1, Spálená 51: technické literatury. ISBN 04-625-83.
- [5] Příspěvatelé Encyklopedie knihy, Papírenský stroj [online], c2018, Datum poslední revize 10. 12. 2018, 22:47 UTC, [citováno 19. 11. 2019]
Dostupné z: http://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Pap%C3%ADrensk%C3%BD_stroj&oldid=15327
- [6] Josef Korda a kolektiv. Oborové encyklopedie papírenská encyklopedie. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-03-00647-3.
- [7] Dr. BOB, Jones. Monitorování pomaloběžných ložisek pomocí Micrologu CMVA 60ULS (ultra nízké otáčky). SKF Condition Monitoring, 1999. 8 s.
- [8] Interní materiály firmy: *Schéma konstantní části a přípravný látky*. Smurfit Kappa Czech s.r.o. Žebrák. [cit. 2020-03-21].
- [9] HOLIK, Herbert, ed. *Handbook of paper and board*. 2nd, rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, c2013. ISBN 978-3-527-33184-0.
- [10] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [11] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivos I*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 8070788836.
- [12] SMETANA, Jaroslav. Monitoring kvality elektrické energie a jak na něj. Řízení & údržba průmyslového podniku. Český Těšín: Trade Media International, červen 2016, roč. 9, č. 2, s. 15-17. ISSN 1803-4535.
- [13] VOŠTOVÁ, Věra, František HELEBRANT a Karel JEŘÁBEK. Provoz a údržba strojů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001025314.
- [14] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001454.
- [15] VUT v Brně, FSI, Ústav automatizace a informatiky – Spolehlivost a technická diagnostika (text pro podporu výuky v kombinovaném studiu) Ing. František Vdoleček, CSc., Brno 2002 [online].
Dostupné z: <https://docplayer.cz/12193120-Spolehlivost-a-technicka-diagnostika.html>
- [16] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-90-1936-2-5.
- [17] ČSN ISO 2041. Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník – Část 2: Vibrace (011400) ČSN ISO 2041. Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník – Část 2: Vibrace. 3. vydání 2009.

- [18] STODOLA, Jiří. Vibrace a jejich využití v technické diagnostice strojů. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2003. ISBN 80-85960-64-8.
- [19] BLATA, Jan. Metody technické diagnostiky: učební text předmětu "Technická diagnostika" ; Metody technické diagnostiky CV : návody do cvičení předmětu "Technická diagnostika". Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN isbn978-80-248-2735-3.
- [20] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská -Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [21] Anon., Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů [online].
- [22] Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html> [Citováno 21. 6. 2020].
- [23] ZUTH, Daniel, VDOLEČEK František. Měření vibrací ve vibrodiagnostice [online]. 2010. [cit.04.10.2015].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375>
- [24] ČSN ISO 5348: Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů
- [25] Anon., Adash - popis softwaru a zařízení.
Dostupné z: <https://adash.com/cs/> [Citováno 5. 5. 2020].
- [26] Interní materiály firmy: *Diflink a schémata zařízení*. Dif spol s.r.o., Bohumín [cit. 2020-04-27].
- [27] Norma ČSN ISO 20186 ČSN ISO 20816-1 (011412). Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny. 2017.
- [28] Anon., Jak pracují nové akcelerometry.
Dostupné z: <http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART1875-Jak-pracuji-nove-3DMEMS-akcelerometry-Freescale-.html> [Ctováno 15. 5. 2020].

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

12.1 Seznam tabulek

TAB 1) POPIS OBRÁZKU Č. 1.....	24
TAB 2) BAREVNÉ ODLIŠENÍ DATABÁZÍ A PŘEHLED ROZDÍLU MEZI STARÝM A NOVÝM DIAGNOSTICKÝM SYSTÉMEM.....	31
TAB 3) MĚŘÍCÍ BODY PŘÍPRAVNÝ LÁTKY A KONSTANTNÍ ČÁSTI.....	44
TAB 4) TABULKA MĚŘÍCÍCH BODŮ MOKRÉ ČÁSTI	46
TAB 5) TABULKA MĚŘÍCÍCH BODŮ SUCHÉ ČÁSTI.....	48
TAB 6) OSTATNÍ MĚŘÍCÍ BODY PAPIRENSKÉHO STROJE	49
TAB 7) MĚŘÍCÍ BODY PŘEVÍJEČE.....	50
TAB 8) OSTATNÍ MĚŘÍCÍ BODY V PAPIRNĚ.....	51
TAB 9) DOPORUČENÉ METODY PRO MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VIBRACÍ PAPIRENSKÉHO STROJE	54
TAB 10) TABULKA PRO VÝPOČET OTÁČKOVÝCH A LOŽISKOVÝCH FREKVENCÍ.....	62
TAB 11) TABULKA PŮVODNÍCH DAT A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO STANOVENÍ MEZÍ EFEKTIVNÍCH HODNOT RYCHLOSTÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE [MM/S].....	76
TAB 12) TABULKA PŮVODNÍCH DAT A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO STANOVENÍ MEZÍ ŠPIČKOVÝCH HODNOT ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE [G]	78
TAB 13) TABULKA PŮVODNÍCH DAT A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO STANOVENÍ MEZÍ HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 3 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE [G]	80
TAB 14) TABULKA PŮVODNÍCH DAT A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO STANOVENÍ MEZÍ HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 2 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE. [G]	82

12.2 Seznam obrázků

OBR. 1) PŘÍKLAD HARMONICKÉHO KMITÁNÍ S VYZNAČENÍM MAXIMÁLNÍ AMPLITUDY, STŘEDNÍ KVADRATICKÉ A ABSOLUTNÍ HODNOTY [10] .	24
OBR. 2) ČASOVÝ PRŮBĚH SLOŽENÝCH VIBRACÍ [10]	24
OBR. 3) ČASOVÝ PRŮBĚH NÁHODNÝCH VIBRACÍ [10]	25
OBR. 4) VÝBĚR VHODNÉ VELIČINY DLE FREKVENCE [20]	27
OBR. 5) KONDENZÁTORY MEMS AKCELEROMETRU ZDROJ POPISEK [27]	28

OBR. 6) ZNÁZORNĚNÍ MECHANICKÉ STRUKTURY MEMS ZDROJ A POPISEK [27]	28
OBR. 7) SCHÉMA TLAKOVÉHO AKCELEROMETRU (VLEVO) A SMYKOVÉHO AKCELEROMETRU (VPRAVO) [10]	29
OBR. 8) VLIV ZPŮSOBU UCHYCENÍ NA AMPLITUDOVOU VE FREKVENČNÍ CHARAKTERISTICE [22]	30
OBR. 9) STARÁ HIERARCHIE DIAGNOSTICKÉ SÍTĚ V ZÁVODU SKMP [25]	32
OBR. 10) NOVÁ HIERARCHIE ONLINE DIAGNOSTICKÉ SÍTĚ V ZÁVODU SKMP [25]	33
OBR. 11) PŘEHLED VŠECH MONITOROVANÝCH SEKCÍ A ZAŘÍZENÍ DIFLINKEM S DETAILEM NA MĚŘENÍ VIBRACÍ ROZVLÁKŇOVAČE [25]	34
OBR. 12) DDS ONLINE S DETAILEM NA MĚŘENÍ LOŽISKA CENTRÁLNÍHO VÁLCE NA STRANĚ POHONU	35
OBR. 13) A4400 VA4 PRO II [24]	36
OBR. 14) ZÁVOD SMURFIT KAPPA MORAVA PAPER A LOGO FIRMY [8]	40
OBR. 15) SCHÉMA KONSTANTNÍ ČÁSTI PAPÍRENSKÉHO [8]	41
OBR. 16) SCHÉMA ROZVLAKŇOVAČE VOITH S MĚŘÍCÍMI BODY (DIFLINK) [25]	42
OBR. 17) SCHÉMA MĚŘÍCÍCH BODŮ SÍTOVÝCH TŘÍDIČŮ CH5 A CH7 (DIFLINK) [25]	42
OBR. 18) SCHÉMA MĚŘÍCÍCH BODŮ SEPARÁTORU RS205 (DIFLINK) [25]	43
OBR. 19) SCHÉMA MĚŘÍCÍCH BODŮ ČERPADEL M334, M421 A M422 [25]	43
OBR. 20) SCHÉMA VLASTNÍHO PAPÍRENSKÉHO STROJE	45
OBR. 21) SCHÉMA SÍTOVÉ ČÁSTI	45
OBR. 22) LISOVÁ ČÁST (VLEVO COMBI LIS A VPRAVO SHOE-PRESS)	46
OBR. 23) SCHÉMA 1. A 2. SUŠÍCÍ SEKCE	47
OBR. 24) SCHÉMA 3. SUŠÍCÍ SEKCE, KLÍŽÍČÍHO LISU A 4. SUŠÍCÍ SEKCE	47
OBR. 25) SCHÉMA 5. SUŠÍCÍ SEKCE A POPE NAVÍJEČE	48
OBR. 26) VLEVO SCHÉMA PŘEVÍJEČE S MĚŘÍCÍMI BODY VIBRACÍ, VPRAVO S MĚŘÍCÍMI BODY TEPLIT [25]	50
OBR. 27) PŘÍKLAD MOŽNÉHO ROZLOŽENÍ ENERGIE U POŠKOZENÉHO LOŽISKA [7]	56
OBR. 28) ZÁVISLOST AMPLITUDY ZRYCHLENÍ NA OTÁČKÁCH PŘI STEJNÉ ZÁVADĚ NA VNĚJŠÍM KROUŽKU LOŽISKA [7]	56
OBR. 29) SPEKTRUM RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP PŘED VÝMĚNOU	63
OBR. 30) SPEKTRUM RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP PŘED VÝMĚNOU PŘIBLÍŽENO NA NEJVVYŠŠÍ ŠPIČKU	63
OBR. 31) SPEKTRUM RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP PO VÝMĚNĚ	64
OBR. 32) KASKÁDA SPEKTER RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP V ČASE	64

OBR. 33) SPEKTRUM ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP PŘED VÝMĚNOU	65
OBR. 34) SPEKTRUM ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP PO VÝMĚNĚ	65
OBR. 35) KASKÁDA SPEKTER ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP V ČASE	66
OBR. 36) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM 3 CEN SP PŘED VÝMĚNOU	66
OBR. 37) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP PŘED VÝMĚNOU PŘÍBLÍŽENO NA NEJVYŠŠÍ ŠPIČKU	67
OBR. 38) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM 3 CEN SP PO VÝMĚNĚ	67
NA OBRÁZKU 39 JSOU VYKRESLENY SPEKTRA OBÁLEK ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM TŘI V ČASE. PO VÝMĚNĚ VÁLCE LZE POZOROVAT ZMIZENÍ HARMONICKÝCH FREKVENCÍ 23,5 HZ	68
OBR. 39) KASKÁDA SPEKTER OBÁLEK ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP V ČASE 68	
OBR. 40) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM 2 CEN SP PŘED VÝMĚNOU	68
OBR. 41) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM 2 CEN SP PO VÝMĚNĚ	69
OBR. 42) SPEKTRUM OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM 2 CEN SP	69
OBR. 43) TREND CELKOVÉ EFEKTIVNÍ HODNOTY RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP 70	
OBR. 44) TREND CELKOVÉ HODNOTY 0-P ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CEN SP	70
OBR. 45) TREND OBÁLKY ZRYCHLENÍ FILTREM 3 LOŽISKA CEN SP	71
OBR. 46) TREND CELKOVÉ HODNOTY OBÁLKY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ FILTREM DVA CEN SP	71
OBR. 47) ČASOVÝ ZÁZNAM RYCHLOSTI VIBRACÍ CEN SP PŘED VÝMĚNOU 72	
OBR. 48) ROZDĚLENÍ EFEKTIVNÍ HODNOTY RYCHLOSTI VIBRACÍ [26]	73
OBR. 49) POROVNACÍ GRAF EFEKTIVNÍCH HODNOT RYCHLOSTI VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP A SO	76
OBR. 50) TREND EFEKTIVNÍCH HODNOT RYCHLOSTI VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4.-25.4.2020)	77
OBR. 51) TREND EFEKTIVNÍCH HODNOT RYCHLOSTI VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4.-14.6.2020)	77
OBR. 52) POROVNÁVACÍ GRAF ŠPIČKOVÝCH HODNOT ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP A SO	78
OBR. 53) TREND ŠPIČKOVÝCH HODNOT ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4.-25.4.2020)	79

OBR. 54) TREND ŠPIČKOVÝCH HODNOT ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4-14.6.2020)	79
OBR. 55) POROVNÁVACÍ GRAF Š HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 3 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP A SO	80
OBR. 56) TREND HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 3 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4.-25.4.2020)	81
OBR. 57) TREND HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 3 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4-14.6.2020)	81
OBR. 58) POROVNÁVACÍ GRAF Š HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 2 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP A SO	82
OBR. 59) TREND HODNOT ŠPIČ-ŠPIČKA OBÁLKY 2 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4.-25.4.2020)	83
OBR. 60) TREND HODNOT ŠPIČKA-ŠPIČKA OBÁLKY 2 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ CENTRÁLNÍHO VÁLCE SP PO VÝMĚNĚ S NASTAVENÝMI NOVÝMI MEZNÍMI HODNOTAMI (5.4-14.6.2020)	83
OBR. 61) VODÍCÍ VÁLEČKY LISOVÉ ČÁSTI A PRVNÍ VODÍCÍ VÁLEČEK SUŠÍCÍ ČÁSTI	85

12.3 Seznam zkratk

$\theta_{v_i}^{RMS}$	–	Efektivní hodnota rychlosti vibrací
$\theta_{a_i}^{0-P}$	–	Špičková hodnota zrychlení vibrací
$\theta_{EN3\ a_i}^{P-P}$	–	Hodnota špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$\theta_{EN2\ a_i}^{P-P}$	–	Hodnota špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací
$\overline{\theta_v^{RMS}}$	–	Průměrná efektivní hodnota rychlosti vibrací
$\overline{\theta_{a_i}^{0-P}}$	–	Průměrná špičková hodnota zrychlení vibrací
$\overline{\theta_{EN3\ a_i}^{P-P}}$	–	Hodnota špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$\overline{\theta_{EN2\ a_i}^{P-P}}$	–	Hodnota špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací
$S_{\theta_v^{RMS}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka efektivní hodnoty rychlosti vibrací
$S_{\theta_a^{0-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka špičkové hodnoty zrychlení vibrací
$S_{\theta_{EN3\ a}^{P-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka hodnoty špička-špička obálky 3 zrychlení vibrací
$S_{\theta_{EN2\ a}^{P-P}}$	–	Výběrová směrodatná odchylka hodnoty špička-špička obálky 2 zrychlení vibrací

KV	-	Krycí vrstva
ZV	-	Základní vrstva
SKMP	-	Smurfit Kappa Morava Paper
PS	-	Papírenský stroj
PL	-	Přípravna látky
XP-P	-	Hodnota špička-špička
X0-P	-	Hodnota špičky
XRMS	-	Efektivní hodnota
Xave	-	Střední hodnota
T	-	Perioda
VEL	-	Rychlost vibrací
ACC	-	Zrychlení vibrací
EN3	-	Obálková metoda filtrem tři
EN2	-	Obálková metoda filtrem dva
RMS	-	Efektivní hodnota
ACC TIME	-	Časový záznam rychlosti vibrací

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Rozdělení měřících bodů dle databází

Příloha 2 - Stanovení mezních hodnot vibrací a vyhodnocení testových měření